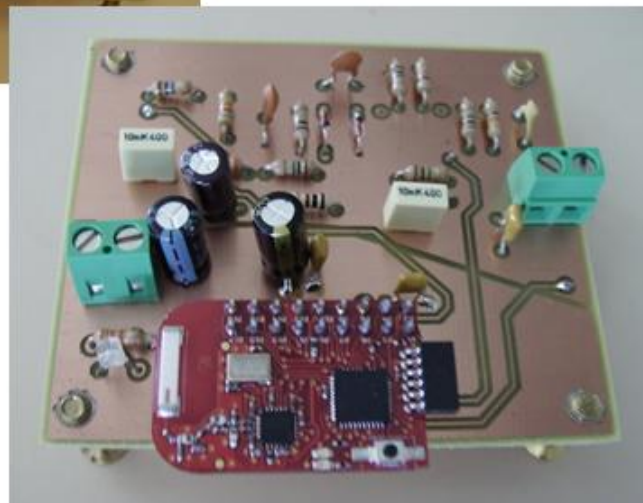
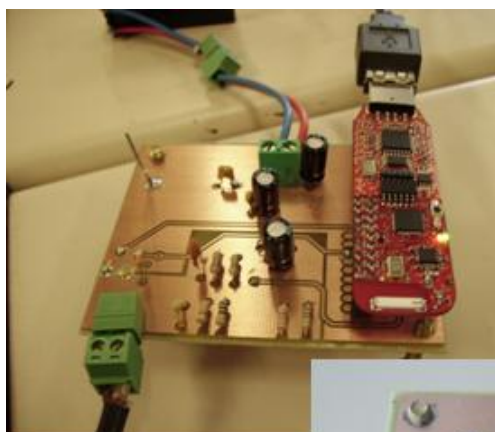




Vítor José Gonçalves  
da Silva

## Sistema de Localização por Ultra-Sons para Museus





**Vítor José Gonçalves  
da Silva**

**Sistema de Localização por Ultra-Sons para Museus**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em MIEET, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor José Manuel Neto Vieira e do Professor Doutor Carlos Alberto da Costa Bastos, Professores auxiliares do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha família e namorada, que me ajudaram e incentivaram ao longo do meu percurso académico.

## **Júri**

Presidente

**Prof. Dr. Dinis Gomes Magalhães Santos**

professor catedrático da do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Vogais

**Prof. Dr. Fernando Manuel dos Santos Perdigão**

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

**Prof. Dr. José Manuel Neto Vieira**

professor auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. Carlos Alberto da Costa Bastos**

professor auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus orientadores por toda a disponibilidade que demonstraram ao longo da elaboração deste trabalho. Agradeço também aos meus amigos da Tocha e Aveiro e colegas da sala 317, por todo o apoio que demonstraram em todos os momentos e pela força que deram para ultrapassar todos os problemas.

## Palavras-chave

Ultra-sons, BPSK (*Binary Phase Shift-Keying*), microcontrolador, modulação, desmodulação, circuito, identificação, museu, obra de arte, PDA (*Personal Digital Assistant*)

## Resumo

O presente documento tem como objectivo descrever a implementação de um sistema de localização por ultra-sons para museus. Serão apresentados alguns sistemas com propósitos próximos ao sistema a construir, descritas e fundamentadas as escolhas para a comunicação entre os dispositivos a implementar e apresentados o hardware e software desenvolvidos.

O sistema é composto por dois dispositivos: o Farol que se destina a ser colocado junto às obras de arte expostas, emitindo uma identificação única, através de um sinal de ultra-sons modulado em BPSK e que é enviado para o segundo dispositivo, a Estação. Este segundo dispositivo será transportado pelos visitantes do museu e deverá ser capaz de recuperar a identificação enviada pelos Faróis. Após recuperação da identificação esta deverá ser enviada através de um módulo *Bluetooth* de modo a ser recebida num PDA que permitirá o acesso aos conteúdos multimédia relativos à obra de arte.

Este sistema foi construído tendo em vista um baixo custo, baixo consumo e pequenas dimensões.

**Keywords**

Ultrasound, BPSK (Binary Phase Shift-Keying), microcontroller, modulation, demodulation, circuit, identification, museum, piece of art, PDA (*Personal Digital Assistant*)

**Abstract**

This document describes the implementation of an ultrasound location system for museums. Some systems with similar purposes will be presented. The choice for communication between the devices to implement will be described and justified and the hardware and software designed for the built system will also be presented.

The system consists of two devices. The first, the Beacon, is to be placed next to the exhibited pieces of art and will have a unique identifier that will be sent to the second device, the Station, through an ultrasound signal modulated in BPSK. This second device will be carried by the visitors of the museum and should be able to recover the identification sent by the Beacons. After recover the identification, the Station sends it via a *Bluetooth* module to a PDA that will allow the access to the multimedia contents relative to piece of art.

This system was designed to be low cost with low consumption and small size.

## Conteúdos

<b>Capítulo 1 - Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 - Enquadramento	1
1.2 - Sistema de localização e identificação por ultra-sons para um museu	2
1.3 – Objectivos	2
1.4 – Organização da dissertação	2
<b>Capítulo 2 – Sistemas de localização e identificação com ultra-sons</b>	<b>5</b>
2.1 – <i>Dolphin</i>	7
2.2 – <i>The Cricket Indoor Location System</i>	7
2.3 – <i>The Bat Ultrasonic Location System</i>	8
2.4 – <i>ORL Location System</i>	9
2.5 - <i>Parrot Location System</i>	10
2.6 - <i>SLIUSM</i>	11
<b>Capítulo 3 – Sistema de identificação de obras de arte em museus</b>	<b>13</b>
3.1 – Descrição do sistema implementado	15
3.2 - Comunicação Farol-Estação	20
3.2.1 - Modulação PSK	22
3.2.2 – Desmodulação diferencial	23
3.2.3 – Amostragem de segunda ordem	25
3.2.4 – Detecção de trama	28
3.2.5 – Algoritmo de decisão	30
3.2.6 – Desvio máximo da portadora	37
3.2.7 – Efeito de Doppler	39
3.2.8 – Estudo utilizando modulação PSK	40
3.3 - Farol	42
3.3.1 - Circuito do emissor de ultra-sons do Farol	43
3.3.2 - Circuito receptor de ultra-sons do Farol	44
3.3.3 - Escolha de componentes	47
3.3.4 – Inclusão de painel solar	48
3.3.5 – Circuito de activação através da luminosidade	48
3.3.5.1 – Filtragem IIR para valores do fototransístor	50



3.3.6 - Ligação do transdutor aos circuitos emissor e receptor .....	52
3.3.7 - Estados de energia do Farol .....	54
3.3.8 - Organização do <i>software</i> do Farol .....	56
3.4 – Estação.....	60
3.4.1 - Circuito emissor da Estação .....	61
3.4.2 - Circuito receptor da Estação .....	62
3.4.3 – Quantificação do ganho necessário à amostragem do sinal .....	62
3.4.4 – Comunicação Bluetooth com PDA.....	64
3.4.4.1 -Escolha do módulo <i>Bluetooth</i> com comunicação série.....	64
3.4.4.2 - Implementação da ligação série MSP-Bluetooth .....	67
3.4.4.3 – Organização do <i>software</i> do módulo de testes <i>Bluetooth</i> .....	68
3.4.5 – Organização do <i>software</i> da Estação .....	70
3.5 - PCBs.....	73
<b>Capítulo 4 – Testes e resultados.....</b>	<b>75</b>
4.1 – Testes de activação do Farol .....	76
4.2 – Testes do circuito de activação através da luminosidade .....	77
4.3 – Testes de desmodulação do sinal recebido.....	78
4.3.1 – Comparação de testes com trabalho anterior .....	83
4.4 – Consumos dos dispositivos.....	83
<b>Capítulo 5 – Conclusões e trabalho futuro .....</b>	<b>85</b>
5.1 – Conclusões.....	85
5.2 – Aspectos do sistema a considerar .....	86
5.3 – Trabalho futuro.....	86
<b>Referências.....</b>	<b>89</b>
<b>Anexo A – Tabela das taxas de erros .....</b>	<b>91</b>
<b>Anexo B – Hardware .....</b>	<b>93</b>
B.1 – Esquema eléctrico de um Farol .....	93
B.2 – Lista de componentes de um Farol .....	94
B.3 – PCB de um Farol .....	95
B.4 – Esquema eléctrico de uma Estação.....	96
B.5 – Lista de componentes de uma Estação .....	97
B.6 – PCB de uma Estação .....	98
B.7 – Esquema eléctrico do módulo de testes <i>Bluetooth</i> .....	99

B.8 – Lista de componentes do módulo de testes <i>Bluetooth</i> .....	99
B.9 – PCB do módulo de testes <i>Bluetooth</i> .....	100
<b>Anexo C - Amostragem de sinais a 160kHz</b> .....	<b>101</b>

## Índice de ilustrações

<b>Figura 2.1</b> – À esquerda o transmissor e à direita o receptor do <i>Dolphin</i> .	7
<b>Figura 2.2</b> – Transmissor e receptor do <i>Cricket</i> .	8
<b>Figura 2.3</b> – Transmissor e receptor do <i>Bat ULS</i> .	9
<b>Figura 2.4</b> – Hardware do SLIUSM [3]: a) dispositivo emissor; b) receptor blindado; c) placa “ <i>Locus Board</i> ”; d) kit eZdsp.	11
<b>Figura 3.1</b> - Exemplo do funcionamento do sistema numa sala de museu.	14
<b>Figura 3.2</b> - Diagrama global do funcionamento do sistema.	16
<b>Figura 3.3</b> - Kit de desenvolvimento eZ430-RF2500.	17
<b>Figura 3.4</b> – Variação da frequência do microcontrolador com a tensão de alimentação para a frequência de 1MHz.	17
<b>Figura 3.5</b> - Circuito elevador de tensão.	18
<b>Figura 3.6</b> - a) Diagrama de radiação dos transdutores MA40S5; b) Aspecto físico de um transdutor; c) Gráfico ganho vs frequência de um transdutor.	19
<b>Figura 3.7</b> - Exemplo dos diferentes tipos de modulação estudados: PSK, ASK e FSK.	20
<b>Figura 3.8</b> – Densidade espectral de potência de: a) um sinal ASK; b) um sinal PSK.	21
<b>Figura 3.9</b> – BER para as modulações PSK, ASK e FSK.	22
<b>Figura 3.10</b> - Modulação BPSK: os sinais dos símbolos ‘0’ e ‘1’ encontram-se desfasados de 180°.	23
<b>Figura 3.11</b> - Gráfico para comparação entre BER da desmodulação BPSK e DBPSK, variando a relação sinal-ruído.	25
<b>Figura 3.12</b> - Esquema de um amostrador de 2ª ordem, em que a segunda amostra, em quadratura ( $Q(n)$ ), possui um atraso temporal de $14fc$ .	26
<b>Figura 3.13</b> - Esquema exemplificativo da amostragem de 2ª ordem utilizada, em que a segunda amostra, em quadratura, possui um atraso temporal de $14fc$ .	26
<b>Figura 3.14</b> – Esquema ilustrativo das componentes do sinal, para detecção de trama.	29
<b>Figura 3.15</b> – Medição do nível de ruído obtido em repouso na ADC, frequência relativa da amplitude do ruído e distribuição acumulada da probabilidade do ruído.	29
<b>Figura 3.16</b> – Medição do nível de ruído obtido ao abanar um aglomerado de chaves. A frequência de amostragem utilizada foi de 160kHz.	30
<b>Figura 3.17</b> - Esquema exemplificativo da divisão das coordenadas bidimensionais.	31
<b>Figura 3.18</b> - Diagrama de blocos da desmodulação do sinal recebido.	32
<b>Figura 3.19</b> - Diagrama bidimensional da localização módulo/fase de dois bits diferentes.	33
<b>Figura 3.20</b> - Gráfico dos testes do algoritmo para detecção de transições de fase.	34
<b>Figura 3.21</b> - Diagrama de blocos final da desmodulação do sinal recebido.	35
<b>Figura 3.22</b> – Exemplo do funcionamento da validação da detecção de trama.	36
<b>Figura 3.23</b> – Exemplo do funcionamento da validação da detecção de trama.	37
<b>Figura 3.24</b> - Diagrama ilustrativo do desvio máximo admissível pela portadora.	38
<b>Figura 3.25</b> - Desempenho da modulação PSK num sistema semelhante [3].	40
<b>Figura 3.26</b> - Diagrama de blocos do Farol.	42

<b>Figura 3.27</b> – Dispositivo Farol desenvolvido.....	43
<b>Figura 3.28</b> - Diagrama de blocos do envio da identificação. ....	43
<b>Figura 3.29</b> - Esquema do circuito emissor da Estação.....	44
<b>Figura 3.30</b> - Esquema do circuito receptor do Farol.....	44
<b>Figura 3.31</b> - Sinal à saída do rectificador centrado em $V_{ref}$ .....	45
<b>Figura 3.32</b> - Exemplos da actuação do comparador Schmidt Trigger. ....	46
<b>Figura 3.33</b> - Esquema do circuito detector de luminosidade. ....	49
<b>Figura 3.34</b> - Diagrama de blocos do filtro IIR.....	51
<b>Figura 3.35</b> - À esquerda: gráfico da simulação do filtro IIR para 5 valores elevados seguidos de 5 valores baixos; à direita: gráfico para valores elevados com uma amostra de erro fortuito ( $\alpha=0.7$ ). .....	51
<b>Figura 3.36</b> – Esquema das ligações do transdutor aos circuitos emissor e receptor do Farol, separadamente. ....	52
<b>Figura 3.37</b> – Esquema das ligações do transdutor ao Farol. ....	53
<b>Figura 3.38</b> - Diagrama de estados de energia do Farol. ....	54
<b>Figura 3.39</b> - <i>Flowchart</i> do <i>software</i> do Farol. ....	57
<b>Figura 3.40</b> – Diagrama temporal do funcionamento do Farol. ....	58
<b>Figura 3.41</b> - Diagrama de blocos da Estação. ....	60
<b>Figura 3.42</b> - Diagrama de blocos para recepção e desmodulação do sinal modulado. ....	61
<b>Figura 3.43</b> – Dispositivo Estação desenvolvido. ....	61
<b>Figura 3.44</b> - Esquema do circuito receptor da Estação.....	62
<b>Figura 3.45</b> – Gráfico da amplitude do sinal recebido em função da distância.....	63
<b>Figura 3.46</b> - Esquema de funcionamento da comunicação de identificações.....	64
<b>Figura 3.47</b> - Aspecto físico do módulo <i>Bluetooth</i> F2M03GLA. ....	66
<b>Figura 3.48</b> - Diagrama de conexão do módulo F2M03GLA. ....	67
<b>Figura 3.49</b> - Módulo de testes para a comunicação <i>Bluetooth</i> implementado. ....	68
<b>Figura 3.50</b> – <i>Flowchart</i> do módulo de testes <i>Bluetooth</i> .....	68
<b>Figura 3.51</b> - <i>Flowchart</i> da Estação. ....	70
<b>Figura 3.52</b> – Diagrama temporal do processamento de uma trama recebida.....	71
<b>Figura 4.1</b> - Esquema utilizado para testes da activação de um Farol.....	76
<b>Figura 4.2</b> – Comportamento do fototransístor mediante diferentes condições de luminosidade.....	77
<b>Figura 4.3</b> – Comportamento do filtro IIR para amostras fortuitas de luminosidade. ....	78
<b>Figura 4.4</b> - Esquema do método utilizado para testes da comunicação entre um Farol e uma Estação. ....	79
<b>Figura 4.5</b> – Posicionamento dos transdutores para testes à distância de 1 metro.....	79
<b>Figura 4.6</b> – Quantificação do número de erros por sequência para as distâncias de 0.5 e 4 metros. São recebidas 5000 identificações por posição. ....	80
<b>Figura 4.7</b> - Esquema de testes para sistema com três Faróis e uma Estação.....	81
<b>Figura 4.8</b> – Resultados obtidos para testes com três Faróis e uma Estação. ....	82

## Índice de tabelas

<b>Tabela 3.1</b> - Tabela exemplificativa da desmodulação diferencial. ....	24
<b>Tabela 3.2</b> - Valores de corrente consumida e sensibilidade do circuito de activação através da luminosidade para valores elevados de luminosidade. ....	49
<b>Tabela 3.3</b> – Consumos dos diferentes componentes do Farol em cada estado. ....	55
<b>Tabela 3.4</b> - Amplitude do sinal recebido pelo transdutor, variando a distância entre o Farol e a Estação. O sinal emitido foi uma sinusóide com amplitude 6.6Vpp e frequência 40kHz. ....	63
<b>Tabela 3.5</b> - Resumo das classes dos dispositivos <i>Bluetooth</i> e respectivas características. ....	65
<b>Tabela 3.6</b> - Módulos <i>Bluetooth</i> com comunicação série seleccionados ( <i>ME – Mouser Electronics; RS – RS-Components</i> ). ....	66
<b>Tabela 4.1</b> – Tabela dos resultados obtidos para activação do Farol. ....	76
<b>Tabela 4.2</b> – Tabela dos resultados obtidos para a desmodulação com um Farol e uma Estação posicionados frontalmente. São recebidas 5000 identificações por posição. ....	79
<b>Tabela 4.3</b> – Tabela da sequência de bits da identificação de cada Farol. ....	81
<b>Tabela 4.4</b> – Tabela dos consumos teóricos e práticos. ....	83
<b>Tabela 4.5</b> – Tabela dos consumos do sistema em várias condições. ....	84

## Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição
$A$	Amplitude do sinal
$B$	Largura de banda
$d_{e,r}$	Distância entre emissor e receptor
$E_b$	Energia de <i>bit</i>
$f$	Frequência emitida
$f'$	Frequência observada
$f_c$	Frequência da portadora
$GBW$	Produto ganho-largura de banda
$I$	Componente em fase
$K$	Temperatura em <i>Kelvin</i>
$N_0$	Densidade espectral de potência do ruído
$N_{per}$	Número de períodos
$Q$	Componente em quadratura
$r$	Ritmo de transmissão
$s_0$	Símbolo '0' da modulação BPSK
$s_1$	Símbolo '1' da modulação BPSK
$T_c$	Período da portadora
$T_b$	Período de <i>bit</i>
$v$	Velocidade da onda no meio
$v_{FE}$	Velocidade relativa entre Farol e Estação
$\omega$	Frequência angular

## Lista de acrónimos

Acrónimo	Descrição
AC	Alternating Current
ADC	Analog to Digital Converter
ASK	Amplitude-Shift Keying
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
DBPSK	Differential Binary Phase-Shift Keying
DC	Direct Current
DSP	Digital Signal Processor
FDP	Função Densidade de Probabilidade
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSK	Frequency-Shift Keying
GPS	Global Position System
IC	Integrated Circuit
IIR	Infinite Impulse Response
IR	Infrared
LED	Light Emitter Diode
MSP	Mixed Signal Products
NRZ	Non-return-to-zero
PC	Personal Computer
PCB	Printed Board Circuit
PDA	Personal Digital Assistant
PSK	Phase-Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RAM	Random Access Memory
RF	Radio frequency
SPI	Serial Peripheral Interface
SMT	Surface-Mount Technology
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
US	Ultrasound
USB	Universal Serial Bus

## **Capítulo 1 - Introdução**

### **1.1 - Enquadramento**

Hoje em dia, o sucesso de qualquer empresa encontra-se directamente ligado à sua adaptação aos avanços da tecnologia, uma vez que, para além das facilidades, automação de actividades e monitorização de sistemas que proporciona, permite também uma elevada redução de custos com pessoal e uma expansão de horários das actividades fabris. Isto levou a que a robótica, automação, domótica, entre outros, se tornassem em áreas de grande desenvolvimento e expansão, pois os seus produtos surgem no nosso dia-a-dia em fábricas, hospitais, comércio e até nos nossos próprios lares. Estes desenvolvimentos tecnológicos contribuíram para a sua generalização de sistemas destas áreas por todo o mundo, tornando possível a sua redução de custos de fabrico e preço final, uma vez que várias técnicas foram desenvolvidas de forma a tornar a produção destes sistemas menos dispendiosa. Hoje em dia, estes sistemas podem ser facilmente implementados numa empresa ou instituição e assim aumentar o desempenho das mesmas e até diminuir os seus custos. É precisamente neste último ponto que este trabalho se insere.

Num museu, existem guias que acompanham os visitantes e os informam sobre as obras expostas, sendo que os visitantes têm de se cingir à velocidade a que esse mesmo guia percorre o museu, dado que várias pessoas visitam o museu ao mesmo tempo. Obviamente o guia não irá avançar para outra obra enquanto alguém demonstrar interesse pela actual.



Será então possível prescindir do guia e tornar possível visitar apenas as obras mais interessantes durante o tempo que cada visitante deseja e obter informação sobre elas?

## **1.2 - Sistema de localização e identificação por ultra-sons para um museu**

Actualmente existem alguns sistemas de informação para museus que permitem aos visitantes obter informação adicional sobre cada uma das obras expostas. Os mais comuns são transportados pelos visitantes e consistem num dispositivo de escuta de sinais áudio, em que os visitantes digitam o código referente à obra sobre a qual pretendem obter informação. No sistema a desenvolver, cada uma das obras expostas irá dispor de um dispositivo que possuirá uma identificação única. Essa identificação será recebida num outro dispositivo, transportado pelo visitante, que irá obter a identificação da obra, podendo a partir daí efectuar diversas operações para disponibilizar informação ao visitante.

## **1.3 – Objectivos**

A realização deste trabalho tem como objectivo construir um sistema de identificação de obras num museu que permita aos visitantes, que transportam consigo um PDA (*Personal Digital Assistant*), receber informação multimédia acerca da obra que estão a visualizar. O sistema a implementar irá consistir num emissor de ultra-sons, que se irá encontrar junto de cada uma das obras e que deverá enviar a sua identificação através de um sinal de ultra-sons modulado. Esse sinal será processado por um receptor de ultra-sons transportado pelos visitantes, que o irá desmodular e que, em comunicação com um PDA, irá permitir aos visitantes aceder às informações acerca dessa obra.

Pretende-se obter um baixo consumo nos dispositivos que irão enviar a identificação de cada obra, pelo que se optou por alimentar os dispositivos a uma tensão de 3.3V, alimentados por duas pilhas AA ou AAA. Um baixo consumo irá permitir um aumento da longevidade das pilhas, reduzindo as despesas na troca/carga das pilhas várias vezes ao longo do ano. Pretende-se que o sistema possua uma autonomia de no mínimo 6 meses.

O sistema deverá ser funcional para distâncias de 1 a 4 metros.

## **1.4 – Organização da dissertação**

Esta dissertação, descreve o estudo e desenvolvimento de um sistema de localização e identificação por ultra-sons para museus e encontra-se dividida em 5 capítulos. O capítulo 1 faz uma introdução e contextualização ao trabalho desenvolvido.

No capítulo 2 são apresentados alguns sistemas de localização e/ou identificação baseados em ultra-sons, descritos na literatura. São feitas referências a esses sistemas bem como uma análise comparativa das suas vantagens e desvantagens.

O capítulo 3 contém todas as decisões efectuadas relativamente ao sistema implementado e o hardware e software desenvolvidos. Será descrita a desmodulação do sinal e todos os circuitos individuais integrados em cada um dos dispositivos.

Os resultados dos testes efectuados serão apresentados no capítulo 4, seguidos de breves análises.

No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões e aspectos a ter em conta em relação a este projecto e sugeridas algumas propostas com vista a melhorar o funcionamento do sistema no futuro.

## Capítulo 2 – Sistemas de localização e identificação com ultra-sons

Os sistemas de localização e identificação por ultra-sons para museus, tema de trabalho deste projecto, permitem substituir os tradicionais guias dos museus. Levou-se a cabo uma pesquisa bibliográfica, não tendo sido encontrados outros sistemas com as mesmas finalidades deste projecto, apesar de esta ser uma área de grande interesse na actualidade. Foram, no entanto, encontrados sistemas com algumas semelhanças, usando ultra-sons, mas que, apesar dessas semelhanças, não foram criados com os mesmos objectivos do sistema a implementar.

Os sistemas encontrados apenas permitem a localização de pessoas ou objectos em espaços interiores, não fornecendo qualquer outro tipo de informação ao usuário. Muitos destes sistemas baseiam-se na medição do tempo de voo dos ultra-sons, ou seja, o tempo que vai desde o envio destes no emissor até à sua chegada ao receptor. Para efectuar esta medição, alguns sistemas recorrem também ao uso de sinais RF (*Radio Frequency*), que devido ao facto de se deslocarem à velocidade da luz, muito superior à velocidade do som, funcionam como referência para o início do envio.

Determinando o tempo de voo será possível calcular a distância que separa o emissor de ultra-sons do receptor, sendo esta dada por:

$$d_{e,r} = T_{voo} \times v \text{ [m]}, \quad (2.1)$$

em que  $d_{e,r}$  é a distância entre emissor e receptor,  $T_{voo}$  corresponde ao tempo de voo e  $v$  à velocidade de propagação dos ultra-sons no ar.

Um ponto a ter em consideração é a variação da velocidade de propagação dos ultra-sons com a raiz quadrada da temperatura, grandezas estas, directamente proporcionais. A relação entre elas é dada pela expressão (2.2) [17].

$$v = 20.1 \times \sqrt{K} \text{ [m/s]}, \quad (2.2)$$

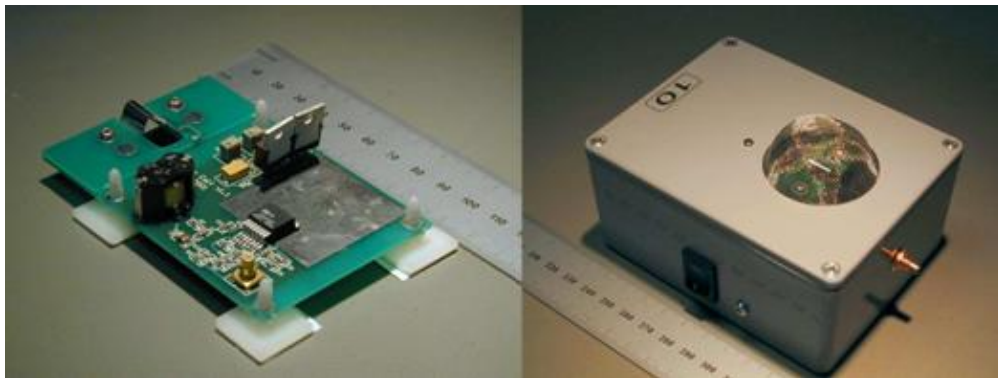
onde a  $K$  corresponde a temperatura do meio em Kelvin.

A utilização de ultra-sons em sistemas destinados à localização e/ou identificação de pessoas ou objectos, tal como no caso deste trabalho, apresenta algumas vantagens para ambientes interiores, em que se pretende a utilização dentro de uma sala, sem propagação para salas anexas. O facto de não atravessarem paredes é uma das grandes vantagens dos ultra-sons, para além do seu alcance limitado. Caso o sistema fosse baseado em sinais RF, estes facilmente atravessariam paredes e o alcance seria demasiado longo, pelo que, um receptor localizado numa sala anexa poderia receber uma identificação de um emissor localizado numa outra sala, o que iria dificultar ou até impossibilitar a implementação do sistema. Apesar disso possui também algumas desvantagens, que não serão de todo inibidoras de levar um sistema deste género avante. Uma delas é o facto de, se entre o emissor e o receptor existir um objecto, o receptor não irá receber o sinal de ultra-sons, uma vez que este não consegue atravessar objectos.

Serão de seguida enumerados e apresentados de forma resumida os sistemas encontrados na literatura.

## 2.1 – Dolphin

O *Dolphin* [6] é um sistema que permite a localização de pessoas no interior de edifícios através de ultra-sons. Existe um dispositivo emissor e um receptor, que permitem determinar se alguém se encontra na área abrangida por este sistema. Este sistema é capaz de enviar e receber sinais RF e de ultra-sons, o que lhe permite determinar a distância entre dois objectos. Caso tenha conhecimento da posição exacta de pelo menos três nós do sistema, o *Dolphin* consegue determinar a posição tridimensional do objecto com uma exactidão de 15cm.



**Figura 2.1** – À esquerda o transmissor e à direita o receptor do *Dolphin*.

### A favor:

- No caso de vários emissores partilharem o mesmo espaço, para que não ocorra interferência entre os sinais, os emissores acedem ao meio utilizando multiplexagem temporal.

### Contra:

- O facto de utilizarem multiplexagem temporal leva a que as taxas de actualização de informação sejam menores.
- Utiliza sensores ultra sónicos de *Piezo Film* que, embora de baixo custo, são muito vulneráveis ao ruído aquando da recepção.
- Necessita de ter elementos com posições fixas.

## 2.2 – The Cricket Indoor Location System

*The Cricket Indoor Location System (Cricket)* [7, 8] é um sistema de localização para ambientes interiores que permite a obtenção de informação acerca da localização, coordenadas e orientação espacial de pessoas ou objectos. É baseado nas tecnologias de ultra-sons e RF para cálculo de distâncias e determinação de coordenadas. São enviados sinais de ultra-sons e RF no mesmo instante, sendo possível calcular a distância entre emissor e receptor através da diferença de tempos em que ambos os sinais são recebidos no receptor. Isto é possível uma vez que os

sinais RF se propagam à velocidade da luz e os sinais de ultra-sons à velocidade do som, sendo a velocidade do primeiro muito maior. Desprezando a velocidade do sinal RF é possível efectuar o cálculo da distância percorrida pelo sinal de ultra-sons, tendo em conta os tempos de chegada de ambos os sinais.



**Figura 2.2** – Transmissor e receptor do *Cricket*.

**A favor:**

- Permite a localização espacial de pessoas ou objectos.
- Baixo consumo.

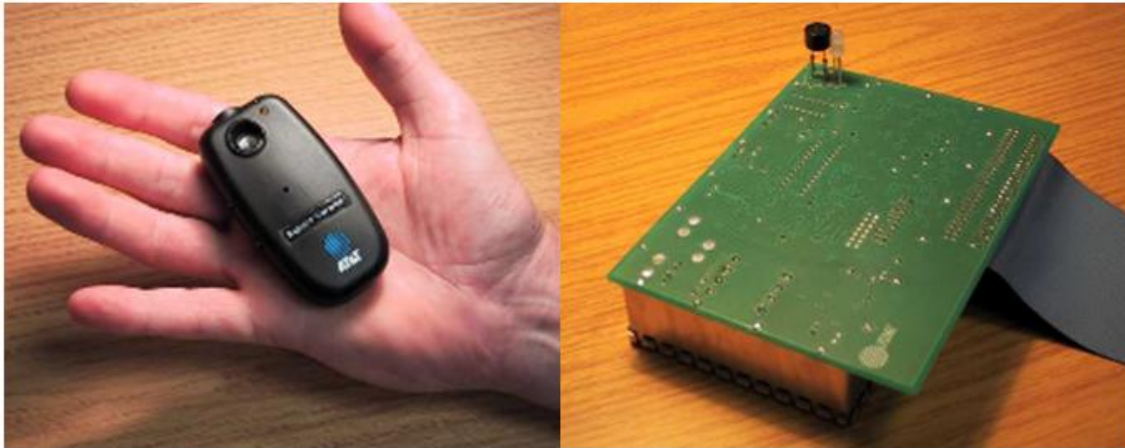
**Contra:**

- Possível interferência dos sinais RF com outros aparelhos (ex: *pacemakers*).
- Propagação de sinais RF através de obstáculos pode causar interferências e erros de medições.
- Reflexões de sinais de ultra-sons podem causar medições erróneas.

## 2.3 – The Bat Ultrasonic Location System

O *The Bat Ultrasonic Location System* [9, 10] é um sistema de localização por ultra-sons baseado na triangulação para determinação da localização espacial do objecto, em que são enviados pulsos de ultra-sons que serão recebidos por dispositivos receptores instalados no tecto de ambientes interiores. É calculado o tempo de voo dos pulsos, permitindo assim determinar a distância do objecto aos receptores. O sinal é recebido por vários receptores, sendo que, para fazer a triangulação do sinal, basta que este seja recebido por 3 receptores diferentes, tornando possível a localização tridimensional do objecto.

Os emissores e receptores são coordenados por um controlador central que envia um sinal rádio aos emissores, funcionando como um pedido para que estes enviem sinais de ultra-sons para posterior detecção por parte dos receptores. Por sua vez os receptores possuem um DSP que irá calcular a distância a que o objecto se encontra, enviando essa informação para o controlador central, através de um cabo série de alta velocidade.



**Figura 2.3** – Transmissor e receptor do *Bat ULS*.

**A favor:**

- Emissor facilmente transportável.
- Dispositivo emissor e receptor discretos para ambientes interiores.
- Baixo consumo.
- Baixo custo.

**Contra:**

- Reflexões de sinais de ultra-sons podem causar medições erróneas.
- Necessidade de ligar os receptores através de cabo série de alta velocidade.

## **2.4 – ORL Location System**

O sistema de localização ORL [11] baseia-se na medição da distância através do tempo de voo dos pulsos, recorrendo à utilização de ultra-sons. Este sistema centra-se num transmissor RF presente no objecto a localizar, sendo este transmissor constituído por um microprocessador, um transdutor de RF, uma FPGA e um vector semi-hemisférico que engloba 5 transdutores de ultra-sons. A identificação de cada um dos elementos é feita através do seu ID, que será único e de 16 bits. Estes dispositivos são alimentados por duas baterias e os módulos receptores colocados no tecto, segundo uma matriz. O sinal de ultra-sons recebido nos módulos receptores será amplificado e irá passar num detector de envolvente para, de seguida, ser amostrado através de uma ADC controlada por uma FPGA, que possibilita a monitorização do sinal.

Os módulos receptores podem ser conectados a uma Estação de controlo, uma vez que possuem uma interface série com a qual podem ser individualmente endereçáveis. Neste caso, sempre que se pretenda enviar uma mensagem RF, a Estação de controlo envia um sinal de reset através da comunicação série, que será recebido pelos módulos receptores de modo a que se preparem para receber os sinais RF e de ultra-sons.

**A favor:**

- Bom desempenho em ambientes de escritório

**Contra:**

- Elevada complexidade do sistema.
- Necessidade de *hardware* específico.

## 2.5 - *Parrot Location System*

O sistema *Parrot* [12] é um sistema baseado na utilização de ultra-sons e RF para uso *indoor* e *outdoor*, descentralizado e com uma exactidão na ordem dos centímetros. Funciona em zonas em que não é possível ou viável a utilização do sistema GPS. O sistema é composto por vários dispositivos emissor/receptor (nós). Cada um destes dispositivos é constituído por um microcontrolador, um transdutor de RF e quatro pares de sensores de ultra-sons que permitem a transmissão e recepção de pulsos. Periodicamente e no seu respectivo espaço temporal, cada um dos nós transmite um sinal RF seguido de um pulso de ultra-sons, o que vai permitir ao nó receptor determinar a distância entre este e o emissor recorrendo à diferença entre os tempos de chegada do sinal de RF e do de ultra-sons. Assim, torna-se possível ao sistema determinar a distância entre os nós e em que direcção o emissor se encontra, distinguindo-se de outros sistemas que usam ultra-sons com pulsos de RF.

Este sistema possui um alcance de até 15m entre dois nós e uma exactidão de cerca de 2cm e tem como grande vantagem o facto de construir uma rede interna de partilha de informação sobre o posicionamento relativo entre *parrots*. A decisão sobre qual dos nós será o primeiro a transmitir é efectuada aquando da inicialização do sistema, gerando depois uma lista com todos os nós activos na rede. Caso ocorra uma falha de transmissão por parte de um dos nós, este é removido da lista previamente criada de modo a permitir que todo o sistema continue em funcionamento. Este sistema não necessita de um nó principal que possibilite o controlo do fluxo de informação.

Uma das grandes desvantagens deste sistema é a insegurança devida à existência de uma rede *wireless* para actualização da tabela de localização, em que cada novo elemento, mesmo que exterior ao sistema, terá acesso a essas tabelas, podendo-se tornar num sistema inseguro e propício a intrusões. Outra das desvantagens é a possível ocorrência de reflexões que poderá gerar falsos positivos. Este sistema pode vir a ser usado como instrumento de auxílio de emergência para equipas de bombeiros, permitindo a localização, identificação e coordenação dos elementos no terreno.

**A favor:**

- Permite saber em que direcção se encontra o emissor.
- Alcance até 15m.
- Exactidão de 2cm.

**Contra:**

- A ocorrência de reflexões pode gerar falsos positivos.
- Pode-se tornar num sistema inseguro.

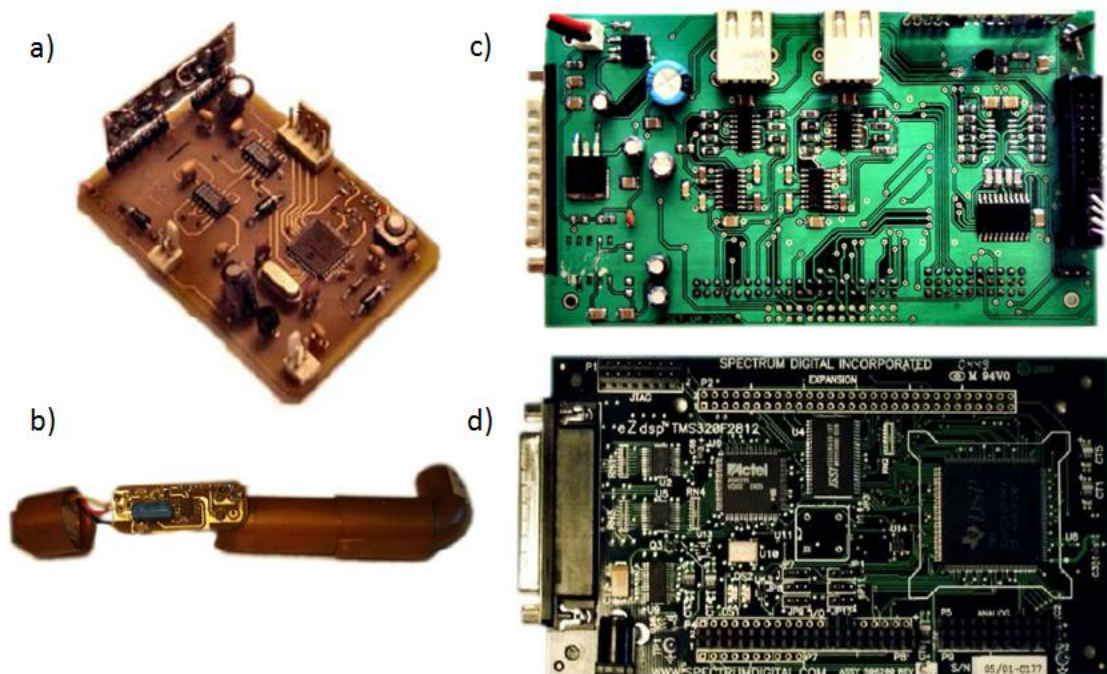


## 2.6 - SLIUSM

O SLIUSM (Sistema de Localização e Identificação por Ultra-Sons para Museus) [3] foi desenvolvido na Universidade de Aveiro. Com este sistema pretende-se utilizar a tecnologia de ultra-sons para o envio de uma identificação modulada em BPSK. Neste sistema existe um dispositivo emissor e um receptor. O emissor é o responsável pelo envio da identificação modulada que será recebida no dispositivo receptor, que irá efectuar a sua desmodulação DBPSK, usando amostragem de primeira ordem a 160kHz.

Este sistema apresenta-se funcional para distâncias de 20cm a 500cm, sendo que apresenta um ganho ajustável, possibilitado pelo seu hardware com grandes capacidades, o que permite que para pequenas distâncias o ganho do receptor seja menor e para grandes distâncias o ganho seja maior. Apresenta também boa resposta em ambientes com múltiplos emissores, em que pode haver interferências entre sinais de diferentes emissores, sendo aconselhada uma separação entre emissores de pelo menos 2 metros.

A figura 2.4 mostra o hardware que constitui as várias partes do SLIUSM. Em a) encontra-se o dispositivo emissor, criado num trabalho anterior [2], cujo intuito é simplesmente enviar periodicamente uma sequência modulada em BPSK. O hardware do receptor é constituído por um receptor blindado com pré-amplificador, em b); a placa “*Locus Board*”, em c), desenvolvida na Universidade de Aveiro e que possui um conjunto de amplificadores programáveis e um filtro passa-banda, possibilitando também a ligação entre o receptor e o *kit eZdsp* presente em d). O *kit eZdsp* é produzido pela *Spectrum Digital* e é utilizado para processamento digital de sinal. É este o responsável pela desmodulação e recuperação do sinal recebido no dispositivo receptor.



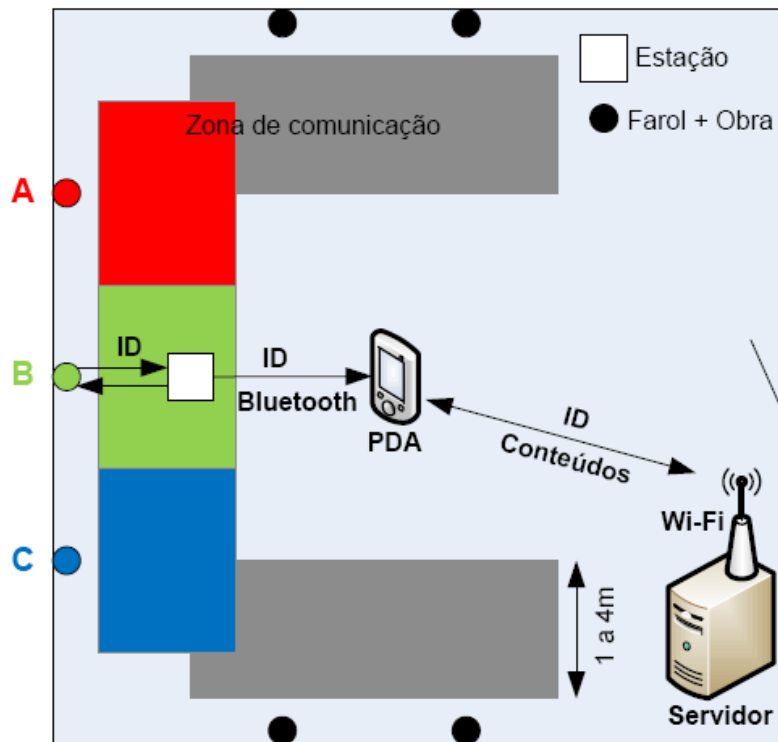
**Figura 2.4** – Hardware do SLIUSM [3]: a) dispositivo emissor; b) receptor blindado; c) placa “*Locus Board*”; d) kit eZdsp.

O SLIUSM não está completamente desenvolvido para um efectivo uso em museus, já que foi desenvolvido com o principal objectivo de testar o uso de sinais de ultra-sons modulados em BPSK para transmissão de uma pequena sequência de *bits*, pelo que ainda não pode ser usado em ambiente real. Além disso, o preço do seu *hardware* ainda é demasiado elevado para que se possa tornar numa solução comercial apelativa para qualquer museu.

## Capítulo 3 – Sistema de identificação de obras de arte em museus

Neste projecto pretende-se projectar e implementar o protótipo de um sistema de identificação de obras de arte em museus que permita a um PDA receber a identificação correcta de determinada obra. Isto irá possibilitar que, um indivíduo que se encontre a visitar um museu, receba informações sobre a obra através de um PDA. Para isso, encontrar-se-á junto a cada obra um dispositivo que envia uma identificação única quando solicitado. O PDA, após receber a identificação, via *Bluetooth*, deverá associá-la a um conjunto de informação multimédia, obtida via *Wi-Fi*, a partir de um servidor. Essa informação será ouvida pelo visitante através dos auriculares conectados ao PDA. A configuração do software para o PDA, servidor e rede *Wi-Fi* não serão abordadas neste trabalho.

A figura 3.1 mostra a planta de uma sala de um museu, onde é possível encontrar alguns Faróis distribuídos pela sala. É também visível a zona onde deverá ser possível efectuar a comunicação entre Faróis, os dispositivos responsáveis pelo envio da identificação (ID) através de ultra-sons e Estações, os dispositivos cuja tarefa será receber a identificação proveniente dos Faróis e transmiti-la através de um módulo *Bluetooth*. Os dispositivos que se encontram junto às obras, serão denominados por Faróis e são representados por círculos, enquanto os dispositivos que se deverão encontrar na zona de comunicação, sendo transportados pelos visitantes, serão denominados por Estações e são representados na figura 3.1 por quadrados.



**Figura 3.1** - Exemplo do funcionamento do sistema numa sala de museu.

O sistema deverá funcionar para distâncias ao Farol de 1 a 4 metros e funcionar por áreas de acção, como se pode verificar pelas áreas coloridas da figura 3.1, em que a cada Farol corresponde a área de acção da sua cor.

Este sistema deverá ter algumas vantagens relativamente a outros sistemas próximos, tais como:

- Baixo consumo;
- Baixo custo;
- Dimensões reduzidas.

Pretende-se que o sistema a desenvolver apresente um baixo consumo. Este aspecto é especialmente importante nos Faróis, uma vez que serão alimentados por pilhas, logo, terão vantagens a nível de mercado caso a longevidade das mesmas seja elevada. Em relação à Estação, esta poderá ser alimentada a partir da bateria de um PDA ou, tal como o Farol, através de pilhas, pelo que a implementação de um baixo consumo neste dispositivo não será tão importante como no caso do Farol. Neste trabalho será abordada apenas a alimentação a pilhas de ambos os dispositivos.

A portabilidade e pequenas dimensões conferem mais vantagens ao sistema, dado que o Farol irá estar junto à obra, pelo que deverá consistir num dispositivo muito discreto. As Estações serão transportadas pelos visitantes, logo deverão possuir pequenas dimensões e elevada portabilidade. O baixo custo será mais uma característica a adicionar a este sistema, uma vez que leva a uma maior facilidade de venda do sistema. Como os museus possuem elevadas quantidades de obras expostas, podendo necessitar de centenas de dispositivos que, caso o seu

custo unitário seja relativamente elevado, irá resultar numa soma avultada que nem todos os museus terão condições de comportar.

Este projecto foi já iniciado num trabalho precedente [3], em que foi desenvolvida essencialmente a comunicação Farol-Estação. O hardware desenvolvido até aqui não é apropriado a um sistema com as características definidas previamente, uma vez que o sistema ainda não se comporta de forma autónoma e o hardware desenvolvido apresenta custos e consumos demasiado elevados. Desta forma os novos circuitos a projectar e implementar devem ser autónomos e permitirem a inclusão de novas funcionalidades no sistema, como modos de baixo consumo e detecção de luminosidade, para além de possuir hardware de menor custo.

Será implementado um novo algoritmo de desmodulação, uma vez que o hardware responsável por tal no projecto anterior tem um custo demasiado elevado. Posto isto, a plataforma *eZdsp* será substituída por um pequeno microcontrolador, que claramente não possui as capacidades de processamento de um DSP. Deste modo não será possível realizar o mesmo tipo de desmodulação usado no sistema anterior, visto que utilizava uma amostragem contínua à frequência de 160kHz. Será então necessário encontrar um novo método, que faça uso de menos recursos de processamento para efectuar a desmodulação e recuperação da identificação emitida pelos Faróis.

Neste capítulo serão abordados alguns pontos essenciais à implementação deste novo sistema, completamente reformulado:

- Implementação de um tipo de desmodulação passível de ser implementado com hardware mais barato (necessariamente com menores capacidades de processamento);
- Desenvolvimento de um dispositivo, o Farol, que permanecerá junto às obras do museu e que identificará, de forma única, cada uma das obras expostas;
- Desenvolvimento de um dispositivo a transportar pelos visitantes, a Estação, que efectue a desmodulação e recuperação da identificação de uma obra;
- Criação de uma plataforma que possibilite o envio da identificação recuperada pela Estação através de um módulo *Bluetooth*;
- Ter em conta os consumos, custo e dimensões dos dispositivos;
- Tornar o sistema autónomo.

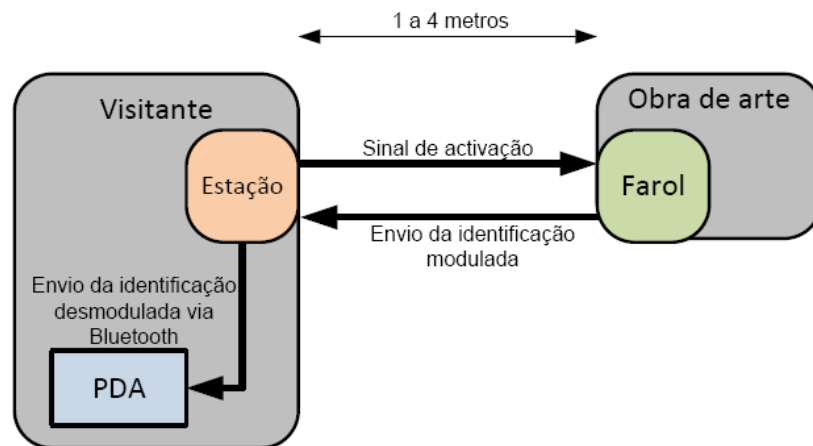
### 3.1 – Descrição do sistema implementado

Quando o visitante entra numa das salas do museu, a Estação deverá activar os Faróis por intermédio de um pulso de ultra-sons, que será recebido pelos Faróis que estiverem dentro do alcance da Estação. Enquanto não existir nenhuma Estação na sala, o Farol encontrar-se-á num estado de baixo consumo. Aquando da recepção dos pulsos da Estação, os Faróis serão acordados por intermédio de uma interrupção. Após a detecção desse pulso de ultra-sons, indiciador da presença de uma Estação nas proximidades, o Farol irá enviar a identificação correspondente à obra em questão, também através de sinais ultra sonoros modulados.

Os Faróis irão enviar a identificação, constituída por 8 bits, periodicamente durante um curto período de tempo, cerca de 1 segundo, devendo entrar, de seguida, num estado de baixo

consumo até que recebam novo sinal de activação. A Estação, após envio do sinal de activação, irá detectar o sinal enviado pelo Farol e efectuar a desmodulação do mesmo, obtendo assim a identificação da obra em questão. Consequentemente, a Estação irá enviar a identificação, possivelmente para um PDA, também transportado pelo visitante, através de um módulo *Bluetooth* indexado à mesma. Um diagrama global do funcionamento do sistema incumbido neste trabalho pode ser encontrado na figura 3.2.

Ambos os dispositivos serão controlados por um microcontrolador e o projecto e implementação deste sistema deverão ter sempre em conta os princípios do baixo custo, baixo consumo e dimensões reduzidas.



**Figura 3.2** - Diagrama global do funcionamento do sistema.

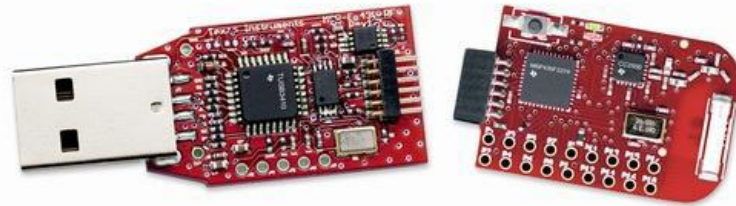
Ambos os dispositivos, terão algumas características essenciais em comum, que vão desde o controlador de todos os procedimentos, até aos transdutores para emissão e recepção dos sinais, passando pela alimentação a pilhas. Estas características serão discriminadas de seguida.

#### • Microcontrolador

Como previamente referido, ambos os dispositivos serão controlados tendo por base um microcontrolador. O microcontrolador escolhido foi o MSP430F2274 da *Texas Instruments*, dado que funciona com tensões de alimentação relativamente baixas, possui vários modos de baixo consumo e inclui uma interface SPI (*Serial Peripheral Interface*) e uma interface UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), necessária para o envio de dados para o módulo *Bluetooth* a utilizar.

O MSP430F2274, doravante designado apenas por MSP, opera com tensões de alimentação entre 1.8 e 3.6V, sendo o seu relógio gerado por um oscilador interno configurável para frequências de 1 a 16MHz. Possui um consumo muito baixo, de 270µA @ 1MHz, 2.2V, no modo activo, podendo ainda ser colocado em *Standby Mode* ou em *Off Mode*, no qual consome 0.1µA. Incorpora 32KB de memória flash e 1KB de memória RAM. O seu tempo de *Wake-Up* do *Standby Mode* e *Off Mode* são inferiores a 1µs e possui uma ADC de 10 bits com referência interna e controlador de transferência de dados, possibilitando um ritmo de amostragem máximo de 200ksps (*samples per second*). Para além do oscilador principal possui ainda outros osciladores com menores frequência e consumo.

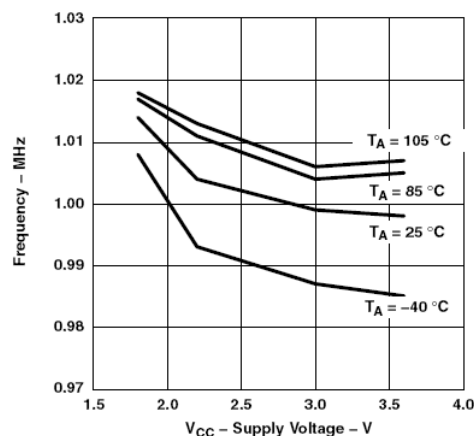
Este microcontrolador encontra-se incorporado no kit de desenvolvimento eZ430-RF2500, que se encontra ilustrado na figura 3.3.



**Figura 3.3** - Kit de desenvolvimento eZ430-RF2500.

À esquerda da figura 3.3 encontra-se o programador deste kit, que possui uma *interface* USB (*Universal Serial Bus*) para comunicação com um PC (*Personal Computer*) e que poderá ser programado com a ferramenta de *software* *IAR Embedded Workbench*. Este programador permite efectuar a comunicação entre o PC e o microcontrolador para efeitos de programação, colecta de dados e *debugging*. À direita encontra-se a placa destino que inclui o microcontrolador e circuitos para comunicação RF, sendo que, a funcionalidade RF não será utilizada no âmbito deste projecto.

Este kit possui um senão, que é o facto de o seu oscilador interno não ser suficientemente preciso para que se consigam gerar ondas a uma frequência exacta de 40kHz, necessárias para a geração de sinais de ultra-sons para os transdutores, dado que possui um erro típico de  $\pm 0.2\%$  e máximo de  $\pm 1\%$ . Este erro do oscilador interno não impossibilita a criação de uma onda de 40kHz relativamente precisa, desde que a tensão de alimentação do microcontrolador se encontre estável, dado que a tensão de alimentação do microcontrolador está relacionada com a frequência do seu oscilador, como se pode comprovar através da figura 3.4.



**Figura 3.4** – Variação da frequência do microcontrolador com a tensão de alimentação para a frequência de 1MHz.

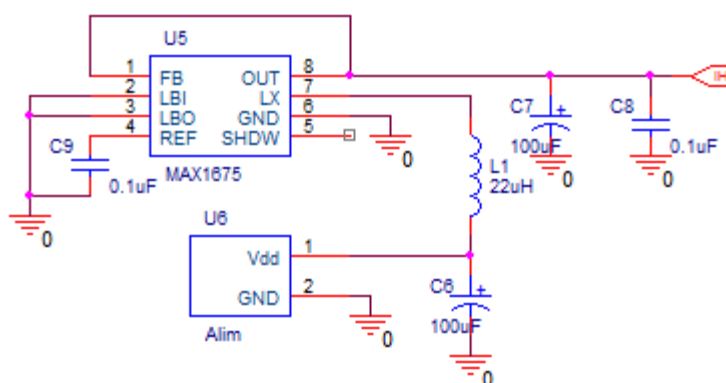
### • Alimentação

Todos os circuitos de ambos os dispositivos são alimentados à tensão de 3.3V. Esta tensão é obtida a partir de duas pilhas AAA de NiMH recarregáveis, montadas em série, que em conjunto disponibilizam uma tensão de 2.4V aos seus terminais. Estas pilhas possuem uma capacidade de fornecimento de corrente de 1000mAh/unidade, totalizando uma capacidade conjunta de 2000mAh. O facto de serem utilizadas pilhas recarregáveis permite uma redução de custos aquando da descarga completa das pilhas, uma vez que estas serão recarregadas, ao invés de serem substituídas. A escolha das pilhas incidiu sobre as pilhas de NiMH devido aos seus pequenos peso e volume, associado ao seu baixo custo e ao facto de serem fáceis de encontrar em qualquer estabelecimento comercial, tornando simples a sua substituição aquando do fim da sua vida útil.

Será necessária a utilização de um elevador de tensão, neste caso um conversor DC-DC, que faculte a obtenção de uma tensão estável, a 3.3V, a partir dos 2.4V disponibilizados pelas pilhas. Este conversor deverá colocar 3.3V na saída, para alimentação do circuito, até que o tempo de vida das pilhas se esgote, permitindo um maior aproveitamento das mesmas, uma vez que a tensão de saída do conversor se mantém em 3.3V mesmo quando a tensão aos seus terminais de entrada se encontra abaixo de 2.4V.

O conversor DC-DC MAX1675 será o responsável por efectuar esta elevação de tensão, dado que apresenta uma eficiência na ordem dos 94% e o seu consumo de corrente é de somente 16μA, para além de manter a tensão de saída constante até uma tensão de entrada mínima de 0.7V, o que possibilita a descarga quase completa das pilhas.

O circuito para este elevador de tensão foi baseado na informação disponibilizada no *datasheet* do conversor. A figura 3.5 mostra o esquema do circuito implementado, em que o terminal FB (*Dual-Mode Feedback Input*) do conversor se encontra ligado à sua saída, de modo a que a tensão de saída deste seja de 3.3V. Os terminais LBI (*Low-Battery Comparator Input*) e LBO (*Open-Drain Low-Battery Comparator Output*) encontram-se ligados à massa, uma vez que estes terminais são relativos ao comparador do conversor, o qual não será utilizado neste caso.



**Figura 3.5** - Circuito elevador de tensão.

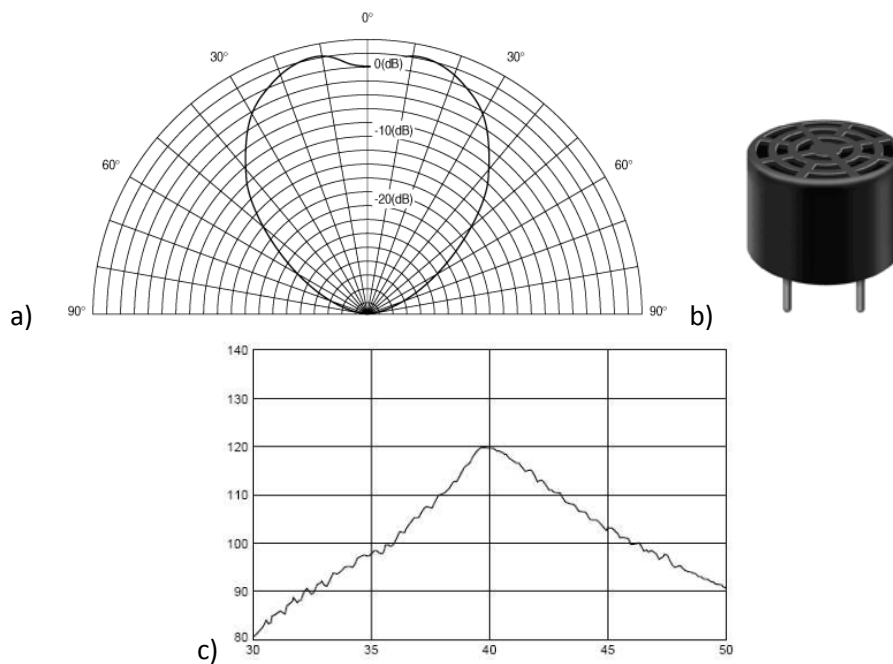
O componente identificado como U6 é o terminal de ligação às pilhas AAA de 1.2V. O componente U5 refere-se ao conversor DC-DC MAX1675. O terminal HI corresponde à saída do circuito, que será uma tensão estável de 3.3V.



### • Transdutores de ultra-sons

Os transdutores escolhidos para o envio e recepção de sinais de ultra-sons foram os MA40S5 da Murata, uma vez que apresentam pequenas dimensões e peso e, especialmente, porque apresentam um menor consumo em relação a outros transdutores e uma directividade relativamente elevada (70°). De referir que quanto maior a directividade dos transdutores, menor será a área abrangida pelos sinais ultra sonoros por eles emitidos. No âmbito deste projecto este facto constitui uma vantagem, uma vez que apenas a área frontal, na perpendicular aos transdutores, deverá ser a área de trabalho, permitindo diminuir as interferências em áreas abrangidas por mais do que um transdutor.

Os transdutores possuem ainda uma largura de banda de cerca de 2kHz, pelo que, cada bit do sinal a enviar deverá ter uma duração mínima igual a  $\frac{1}{2kHz} = 0.5ms$ , sendo que neste projecto foi considerado que terá a duração de 2ms. Na figura 3.6 encontram-se alguns dados provenientes do *datasheet* dos transdutores escolhidos, sendo de salientar a figura 3.6-c), em que se verifica que a amplitude do sinal enviado é máxima à frequência de 40kHz.



**Figura 3.6** - a) Diagrama de radiação dos transdutores MA40S5; b) Aspecto físico de um transdutor; c) Gráfico ganho vs frequência de um transdutor.

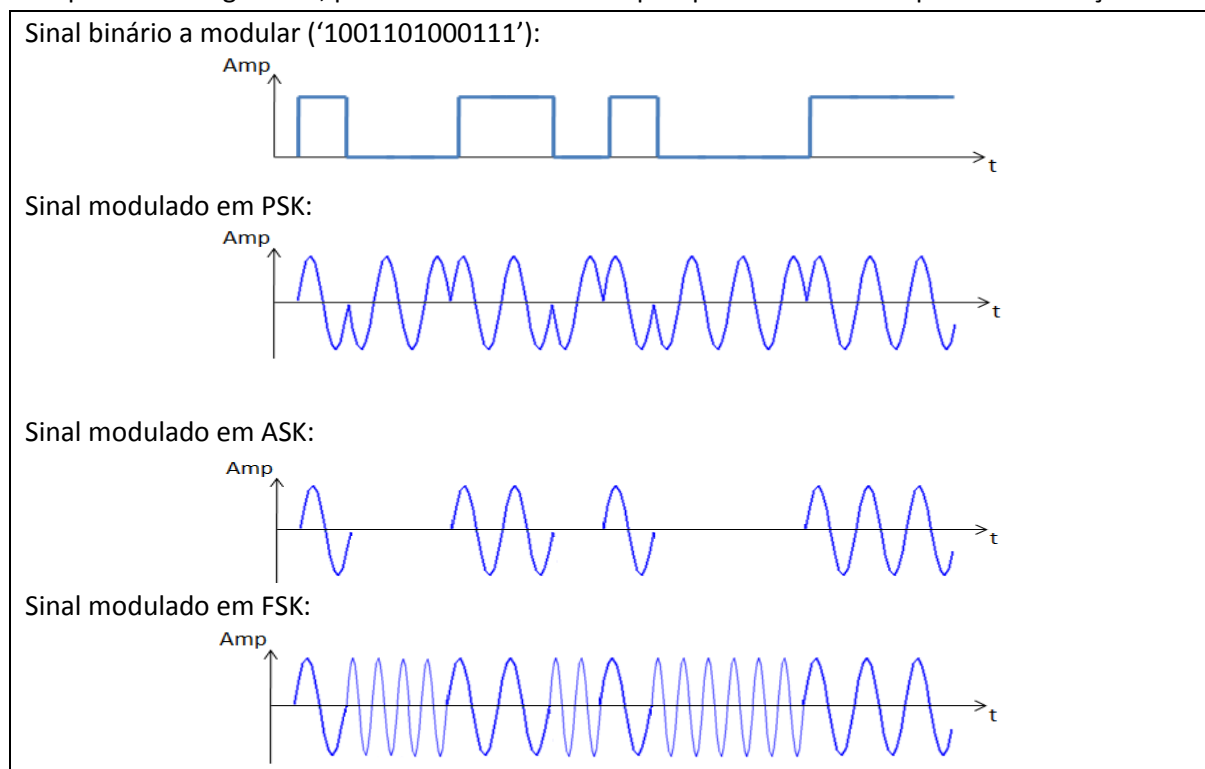
## 3.2 - Comunicação Farol-Estação

Sabendo-se da necessidade de comunicação entre o Farol e a Estação, de modo a que a identificação da obra seja transmitida, urge encontrar uma forma de fazer com que essa informação seja enviada pelo Farol e recebida na Estação com sucesso, sem grandes custos e consumos de energia e sem grande complexidade. Essa comunicação será feita recorrendo ao uso de transdutores de ultra-sons. Quando é aplicada uma onda à frequência de 40kHz aos terminais dos transdutores, estes apresentam uma resposta em frequência a 40kHz, com uma largura de banda de 1 kHz, gerando assim os sinais ultra sonoros. É com base nestes sinais que será efectuada a comunicação da identificação da obra. Existem várias possibilidades de codificar a informação enviada, destacando-se a modulação PSK (*Phase Shift Keying*), ASK (*Amplitude Shift Keying*) e FSK (*Frequency Shift Keying*) [1].

A modulação PSK é conseguida através da variação da fase de uma portadora, sendo que numa modulação binária em que existem dois símbolos a modular a diferenciação entre símbolos está relacionada com a fase da portadora, sendo que do símbolo '0' para o símbolo '1' existe uma variação de fase de  $\pi$  radianos.

Na modulação ASK o símbolo '0' corresponde à ausência de sinal, enquanto ao símbolo '1' equivale a um sinal à frequência do sinal emitido pelos transdutores, cuja amplitude de saída dos transdutores varia consoante a tensão aos terminais dos mesmos.

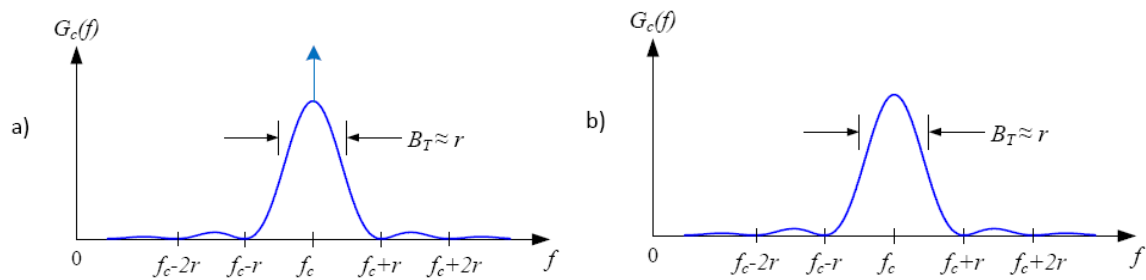
Já na modulação FSK, a cada um dos símbolos corresponde um sinal de diferente frequência. Na figura 3.7, podem-se observar exemplos para estes vários tipos de modulação:



**Figura 3.7** - Exemplo dos diferentes tipos de modulação estudados: PSK, ASK e FSK.

Conhecidos os princípios básicos de cada tipo de modulação, há então necessidade de escolher um destes tipos de modulação. A primeira a excluir será, desde logo, a modulação FSK, uma vez que para este tipo de modulação é inevitável o uso de duas frequências distintas, pelo que a densidade espectral de potência vai ter dois picos principais, correspondentes a duas frequências. Devido ao uso dos transdutores de ultra-sons para envio de informação, e visto estes funcionarem a uma frequência de  $40 \pm 1$  kHz, com uma largura de banda de cerca de 2kHz, cujo ganho máximo corresponde à frequência de 40kHz, caso fosse utilizada a modulação FSK, por exemplo, às frequências de 39kHz e 41kHz, o ganho a cada uma das frequências poderia não ser idêntico, tendo o sinal modulado de cada um dos símbolos uma amplitude discrepante. Outro factor importante para a exclusão da modulação FSK é o facto de apresentar uma probabilidade de erro superior à modulação PSK. Devido aos factos anteriormente enunciados e à pequena diferença entre as frequências possíveis de utilizar nestas circunstâncias, a modulação FSK foi desde logo excluída.

A escolha incide assim entre a modulação ASK e PSK. A diferença entre estes dois tipos de modulação encontra-se na sua densidade espectral de potência, representada na figura 3.8, em que a modulação ASK tem uma menor eficiência energética, uma vez que a componente da portadora é maior que no caso da modulação PSK.



**Figura 3.8** – Densidade espectral de potência de: a) um sinal ASK; b) um sinal PSK.

Para além disso, e analisando a figura 3.9, verifica-se que, para uma mesma relação sinal-ruído, a modulação PSK ostenta um menor BER (*Bit Error Rate*) que a modulação ASK e até que a FSK. Isto, aliado ao facto de se pretender um sistema com um consumo energético reduzido, levou a que a modulação PSK fosse a escolhida para aplicação neste sistema, dado que, em relação à modulação ASK, apresenta uma maior eficiência energética para a mesma probabilidade de erro.

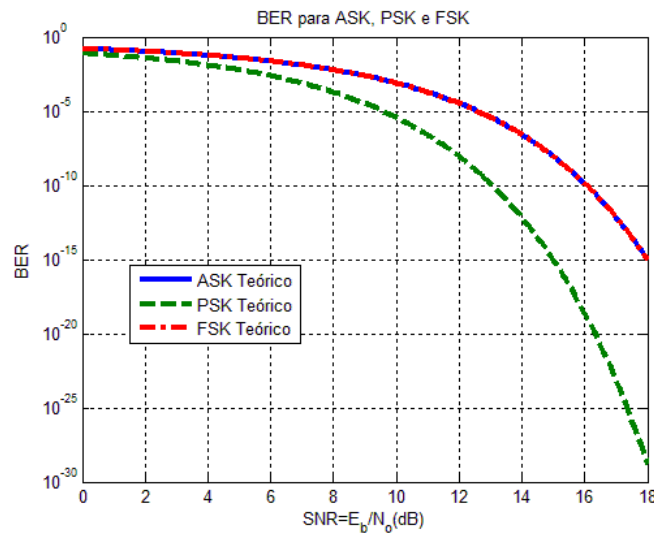


Figura 3.9 – BER para as modulações PSK, ASK e FSK.

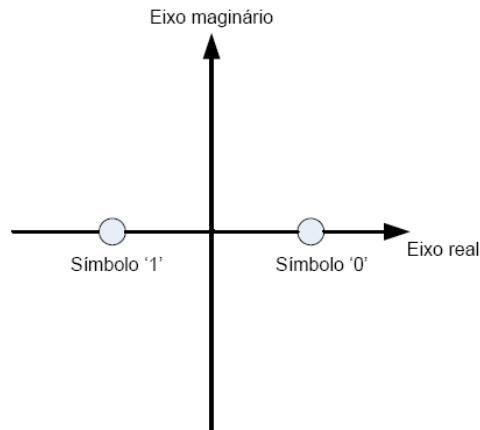
De uma análise da figura 3.9, obtida através da ferramenta *bertool* do *MatLab*, constata-se que o BER da modulação PSK é menor que o das modulações ASK e FSK, sendo que estas últimas apresentam aproximadamente o mesmo BER para um canal com ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*).

### 3.2.1 - Modulação PSK

Hoje em dia a modulação PSK é muito utilizada em telemetria, uma vez que apresenta uma das menores probabilidades de erro [1] e não tem componente DC, o que levaria a um desperdício de energia. Estas características levaram a que fosse aplicada a sistemas de comunicação comerciais e militares, sendo que muitas comunicações terrestres e por satélite são efectuadas com recurso à modulação PSK.

Dentro da modulação PSK, existem vários tipos de modulação, distinguindo-se cada uma delas pela sua complexidade a nível do número de fases possíveis da sua constelação, o que leva a uma variação do número de símbolos que o seu alfabeto contém. Assim, como exemplos mais elementares, existem a modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), cujo alfabeto contempla dois símbolos e a modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) cujo alfabeto contempla 4 símbolos.

Para comunicação neste sistema será utilizada a modulação BPSK, que consiste num tipo de modulação PSK em que a informação é enviada variando a fase da portadora em 180°, de modo a representar os símbolos '0' e '1', alterando-se a fase apenas quando há transição entre níveis lógicos diferentes. Os valores da fase neste tipo de modulação apresentam-se como 0° para o símbolo '0' e 180° para o símbolo '1'. Visto que somente se pretende enviar 8 bits de dados, não há necessidade de recorrer a um sistema mais complexo que o BPSK (figura 3.10).



**Figura 3.10** - Modulação BPSK: os sinais dos símbolos '0' e '1' encontram-se desfasados de 180º.

A largura de banda deste sinal corresponde ao dobro da largura de banda do sinal em banda base.

### 3.2.2 – Desmodulação diferencial

A desmodulação diferencial, neste caso DPBSK (*Differential Bipolar Phase Shift Keying*), uma vez que a modulação a implementar é a BPSK, permite evitar a extracção de sincronismo de portadora no receptor, dado que o sinal de entrada sofre codificação diferencial e é transmitido com recurso à modulação PSK.[1] Para além disso, este tipo de desmodulação possibilita uma elevada imunidade às variações da frequência da portadora.

Neste tipo de modulação, quando se pretende enviar um '0', a forma de onda do sinal sofre um avanço de fase de 180º, enquanto que, quando o bit a enviar corresponde ao nível lógico '1', o sinal enviado mantém a sua fase. Assim, caso sejam transmitidos dois '1' no período de 0 a  $2T_b$  ter-se-á [1]:

$$\text{para } 0 < t < T_b: \quad \sqrt{\frac{E_b}{2T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad (3.1)$$

e

$$\text{para } T_b < t < 2T_b: \quad \sqrt{\frac{E_b}{2T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad (3.2)$$

Caso seja transmitido um '1' seguido de um '0', ter-se-á:

$$\text{para } 0 < t < T_b: \quad \sqrt{\frac{E_b}{2T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad (3.3)$$

e

$$\text{para } T_b < t < 2T_b: \quad \sqrt{\frac{E_b}{2T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi), \quad (3.4)$$

em que a  $E_b$  corresponde a energia de bit, a  $T_b$  o tempo de bit, a  $f_c$  a frequência da portadora e a  $t$  o instante temporal.

Neste último caso verifica-se uma transição de fase da portadora aquando do envio de um bit ao qual corresponde o nível lógico '0'.

A probabilidade de erro ( $P_e$ ) deste tipo de desmodulação é dada por:

$$P_e = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{-E_b}{N_0}\right), \quad (3.5)$$

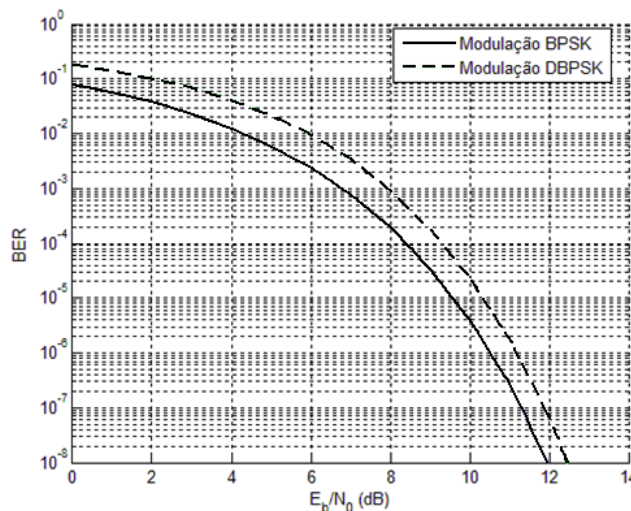
em que a  $N_0$  corresponde a densidade espectral de potência do ruído.

A tabela 3.1 mostra um exemplo da sequência '11001011' codificada para a desmodulação diferencial. Verifica-se a necessidade de um bit extra para possibilitar a correcta desmodulação da sequência. Esse bit será determinante para que a sequência desmodulada corresponda à efectivamente enviada e não ao seu inverso.

<b>Sequência a transmitir</b>		1	1	0	0	1	0	1	1
<b>Sequência Codificada</b>	1	1	1	0	1	1	0	0	0
<b>Fase a transmitir</b>	$\pi$	$\pi$	$\pi$	0	$\pi$	$\pi$	0	0	0
<b>Comparação de Fase</b>		+	+	-	-	+	-	+	+
<b>Mensagem decodificada</b>		1	1	0	0	1	0	1	1

**Tabela 3.1** - Tabela exemplificativa da desmodulação diferencial.

Na figura 3.11, obtida através da ferramenta *bertool* do *MatLab*, encontra-se um gráfico comparativo entre o BER da desmodulação BPSK síncrona e a desmodulação DBPSK para vários valores da relação sinal-ruído.

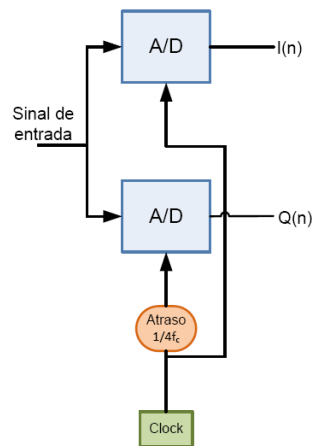


**Figura 3.11** - Gráfico para comparação entre BER da desmodulação BPSK e DBPSK, variando a relação sinal-ruído.

Analisando a figura 3.11, constata-se que a desmodulação BPSK apresenta uma imunidade ao ruído superior à desmodulação DBPSK para a mesma relação sinal-ruído. No entanto, o facto de a desmodulação DBPSK ser menos complexa, ao evitar a existência da portadora no receptor, leva a que a pequena diferença entre o BER de ambas não seja suficiente para que a desmodulação BPSK seja mais vantajosa para o sistema a implementar.

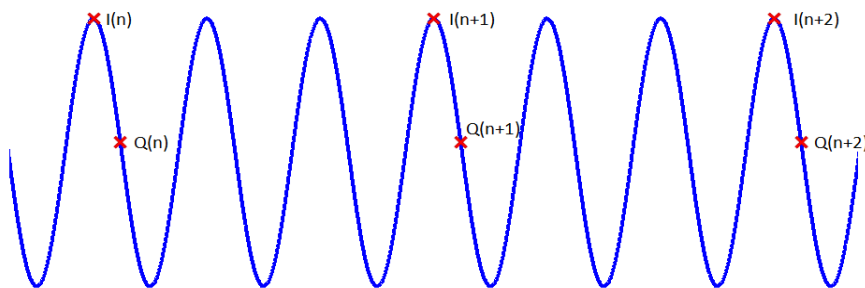
### 3.2.3 – Amostragem de segunda ordem

A amostragem de segunda ordem consiste na amostragem de determinado sinal, gerando amostras que facultam a identificação da fase e quadratura do mesmo [4]. Na figura 3.12 é possível encontrar um esquema de um amostrador de segunda ordem. A partir desse amostrador são adquiridas duas amostras a determinada frequência, sendo que a segunda amostra,  $Q(n)$ , corresponde determinado atraso de fase do sinal recebido, o que vai permitir identificar as coordenadas bidimensionais do sinal. No caso esquematizado esse atraso é de  $\frac{1}{4f_c}$ . Este tipo de amostragem apresenta vantagens em relação à amostragem de primeira ordem, uma vez que a quantidade de amostras necessária é muito menor, conseguindo-se extrair a mesma informação para o objectivo ambicionado com este sistema.



**Figura 3.12** - Esquema de um amostrador de 2ª ordem, em que a segunda amostra, em quadratura ( $Q(n)$ ), possui um atraso temporal de  $\frac{1}{4f_c}$ .

Na figura 3.13 é possível encontrar um esquema exemplificativo da amostragem de segunda ordem. A cada período de amostragem são retiradas duas amostras desfasadas, neste caso, em  $\frac{1}{4f_c}$ . À primeira amostra, na figura 3.13 denominada por  $I(n)$ , corresponde a componente em fase do sinal, enquanto à segunda amostra, denominada por  $Q(n)$ , corresponde a componente em quadratura desse mesmo sinal.



**Figura 3.13** - Esquema exemplificativo da amostragem de 2ª ordem utilizada, em que a segunda amostra, em quadratura, possui um atraso temporal de  $\frac{1}{4f_c}$ .

A técnica de amostragem de segunda ordem é bastante adequada a este projecto, uma vez que se pretende determinar quando ocorre uma variação de fase da portadora. Este projecto seria exequível tanto recorrendo à amostragem de primeira como de segunda ordem, embora esta última tenha as vantagens de ser mais simples de implementar e necessitar de uma menor quantidade de amostras. Este último aspecto revelar-se-á muito importante na medida em que se pretende implementar um sistema em tempo-real, recorrendo a um MSP, que possui uma ADC com capacidades limitadas, muito inferiores às de sistemas mais complexos, como é o caso dos DSPs (*Digital Signal Processor*) e possibilitando ainda um menor consumo de energia. O MSP (*Mixed Signal Products*) possui uma capacidade de amostragem máxima de 200ksps (*samples per second*), sendo que para o caso da amostragem de primeira ordem seriam necessárias 82ksps,



correspondentes à soma do dobro da frequência da portadora com a largura de banda, enquanto para a amostragem de segunda ordem esse valor poderá ser reduzido para o dobro da frequência máxima do sinal na banda base. No caso do sistema anterior [3], a frequência de amostragem utilizada para amostragem de 1ª ordem era, por conveniência, de 160ksps. Note-se que na amostragem de segunda ordem se obtêm duas amostras, componentes em fase e quadratura, em cada instante de amostragem.

Outro aspecto a ter em conta são as discrepâncias entre as frequências dos osciladores do dispositivo emissor e receptor, provenientes dos microcontroladores. Estes osciladores possuem um erro máximo na frequência de  $\pm 1\%$ , o que poderá levar a que, se a frequência de amostragem for demasiado baixa, estes deslocamentos da frequência dos osciladores possam acarretar variações do sinal e provocar a detecção de falsas transições de fase aquando do processamento das amostras para decisão de bit.

Como já foi referido pretende-se que este sistema funcione em tempo-real, pelo que ao serem adquiridas duas amostras, estas serão desde logo processadas. Isto não seria realizável recorrendo à amostragem de primeira ordem, a 160kHz, uma vez que entre duas amostras o microcontrolador não teria tempo de efectuar o seu processamento, devido à elevada frequência de amostragem, que consumiria a maioria dos recursos de processamento do microcontrolador.

Posto isto é imprescindível verificar se com um atraso no tempo, para aquisição da componente em quadratura, as componentes do sinal amostrado correspondem efectivamente às componentes do sinal original. Para tal, e recorrendo a [4], estes sinais serão relacionados de seguida.

Ao sinal modulado recebido pela Estação corresponde a seguinte expressão:

$$S(t) = A(t)e^{-j(\omega_c t - \phi(t))} = A(t) \cos(\omega_c t - \phi(t)) - jA(t) \sin(\omega_c t - \phi(t)) \quad (3.6)$$

A partir de (3.6) são obtidas as componentes em fase e quadratura do sinal:

$$I(t) = \text{Re} \{S(t)\} = A(t) \cos(\omega_c t - \phi(t)) \quad (3.7)$$

$$Q(t) = \text{Im} \{S(t)\} = -A(t) \sin(\omega_c t - \phi(t)) \quad (3.8)$$

A componente em quadratura é amostrada com um atraso de um quarto da portadora, ou seja,  $\frac{1}{4f_c} = \frac{\pi}{2\omega_c}$ . Daqui são obtidas as seguintes expressões das componentes em fase e quadratura após amostragem, em que  $n$  é o número da amostragem:

$$I(nT) = A(nT) \cos(\omega_c nT - \phi(nT)) \quad (3.9)$$

$$Q(nT) = I \left\{ nT + \frac{\pi}{2\omega_c} \right\} = A \left( nT + \frac{\pi}{2\omega_c} \right) \cos \left( \omega_c \left( nT + \frac{\pi}{2\omega_c} \right) - \phi \left( nT + \frac{\pi}{2\omega_c} \right) \right) \quad (3.10)$$

Considerando que o sinal recebido apresenta uma variação muito pequena ao longo do período de bit, visto o Farol e a Estação apresentarem aproximadamente a mesma frequência de relógio, podem-se efectuar as seguintes aproximações:

$$A\left(nT + \frac{\pi}{2\omega_c}\right) \approx A(nT) \quad (3.11)$$

$$\phi\left(nT + \frac{\pi}{2\omega_c}\right) \approx \phi(nT) \quad (3.12)$$

Substituindo (3.11) e (3.12) em (3.10), obtém-se a componente em quadratura do sinal amostrado:

$$Q(nT) \approx A(nT) \cos\left(\omega_c\left(nT + \frac{\pi}{2\omega_c}\right) - \phi(nT)\right) \approx -A(nT) \sin(\omega_c nT - \phi(nT)) \quad (3.13)$$

Deste modo ao sinal amostrado corresponde:

$$S(nT) = A(nT) \cos(\omega_c nT - \phi(nT)) - jA(nT) \sin(\omega_c nT - \phi(nT)) \quad (3.14)$$

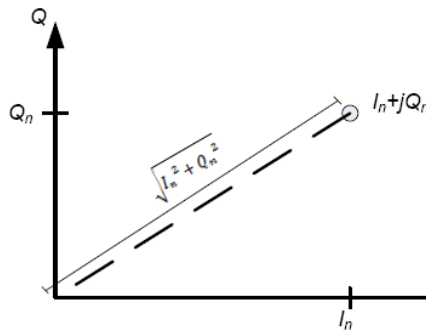
Comparando (3.14) com (3.6), verifica-se que as componentes em fase e quadratura do sinal amostrado correspondem, por aproximação, às mesmas componentes do sinal original, considerando  $t = nT$ .

### 3.2.4 – Detecção de trama

O início de trama será detectado a partir da amplitude do sinal recebido, traduzida nos valores das leituras da ADC, recorrendo a uma amostragem de segunda ordem. Enquanto não há recepção de sinal, o valor lido pela ADC mantém-se, teoricamente, próximo do valor centro da ADC. Sabendo que se trata de uma ADC de 10 bits, logo, a sua gama de leitura é variável entre 0 e 1023, ao valor centro da ADC irá corresponder o valor 511.

Ocorrerá detecção do início da trama quando a soma do módulo das componentes em fase e quadratura ultrapassar determinado limiar. Caso seja recebido um sinal com amplitude suficiente, a amostragem de segunda ordem garante que pelo menos uma das componentes ultrapassa o limiar. Mesmo que uma delas possua o valor da ADC quando não há sinal recebido, próximo de 511, a outra componente, por estar desfasada da primeira em um quarto do período, terá um valor superior ou inferior que, caso a soma do módulo de ambas ultrapasse o limiar, será considerado que a trama foi detectada, procedendo-se à desmodulação do sinal.

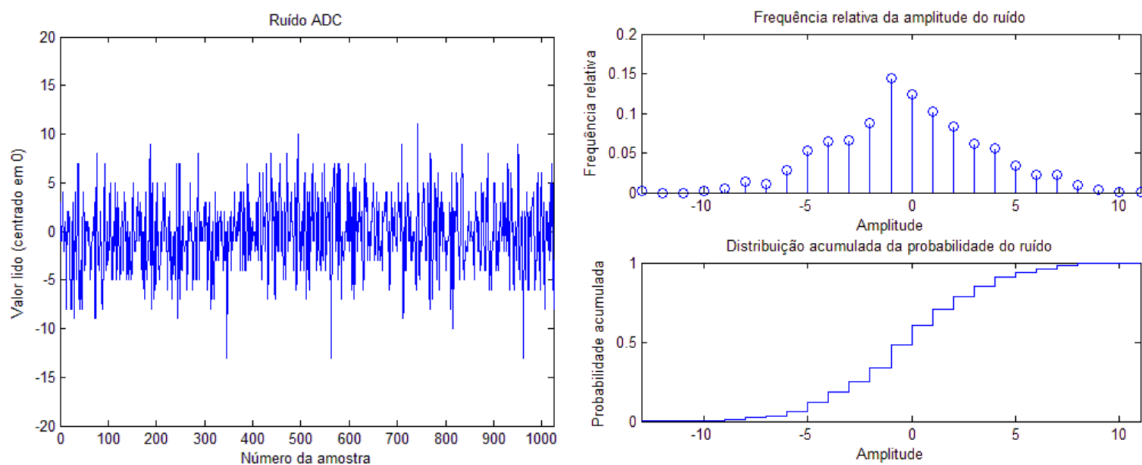
Trata-se então de efectuar a aproximação da amplitude da envolvente  $\sqrt{I_n^2 + Q_n^2}$  por  $|I_n| + |Q_n|$ , como se pode verificar na figura 3.14, em que a  $I_n$  correspondem as amostras em fase do sinal e a  $Q_n$  as amostras em quadratura.



**Figura 3.14** – Esquema ilustrativo das componentes do sinal, para detecção de trama.

A frequência de amostragem deverá ser suficientemente pequena para garantir que ao longo de um *bit* sejam realizadas pelo menos duas amostragens, apenas para o caso de a primeira amostragem não ser correcta, por excesso de ruído ou por não ser realizada nenhuma amostragem durante o tempo de duração do primeiro bit. Assim, e sendo o tempo de bit igual a 2ms, a frequência mínima a utilizar para que sejam realizadas duas amostragens é de 1kHz.

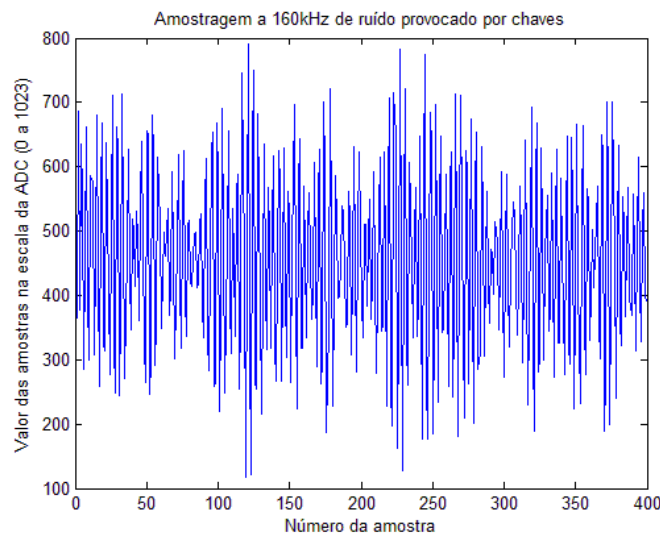
Para quantificação dos limiares a utilizar para a detecção de trama foi realizada uma amostragem do sinal recebido na ADC quando nenhum Farol se encontra a emitir a sua identificação. Os resultados dessa amostragem são apresentados na figura 3.15, em que os valores lidos pela ADC foram centrados em 0.



**Figura 3.15** – Medição do nível de ruído obtido em repouso na ADC, frequência relativa da amplitude do ruído e distribuição acumulada da probabilidade do ruído.

Efectivamente verifica-se que o sinal lido pela ADC, na ausência de sinais de ultra-sons, gira à volta do valor 0 (513 na ADC). Analisando a FDP do ruído, na figura 3.15, verifica-se que o desvio padrão é de 3.57, tendo o ponto máximo obtido o valor de 11 (524 na ADC) e o mínimo -13 (500 na ADC). Deste modo, e tendo em conta que  $|I_n| + |Q_n|$  para valores intermédios da ADC (511) será 1022, os limiares detecção de trama foram estabelecidos em 1064, o limiar máximo e 980 o limiar mínimo, de modo a permitir alguma margem de manobra para ambientes mais ruidosos.

Foram também realizados testes de modo a averiguar o ruído introduzido no sistema ao abanar um aglomerado de chaves. Sabendo que este acto cria sinais de ultra-sons, será interessante do ponto de vista do ruído, quantificar os valores da amplitude dos sinais gerados. Na figura 3.16 são apresentados os resultados deste teste.



**Figura 3.16** – Medição do nível de ruído obtido ao abanar um aglomerado de chaves. A frequência de amostragem utilizada foi de 160kHz.

Analisando a figura 3.16 verifica-se que o ruído introduzido por um aglomerado de chaves apresenta uma amplitude bastante elevada. Será necessário, por isso, encontrar forma de reduzir o efeito provocado por este tipo de ruído no sistema.

Comparando este sinal com os obtidos no Anexo C (Amostragem de sinais a 160kHz) com um sinal contínuo e um sinal modulado, verifica-se que o sinal da figura 3.16 é mais irregular, ao contrário dos sinais apresentados no Anexo C.

### 3.2.5 – Algoritmo de decisão

Após a detecção do início da trama, recorrendo à amostragem de segunda ordem e à soma dos módulos das componentes em fase e quadratura extraídas, o sistema irá proceder à desmodulação do sinal. Esta será realizada recorrendo também à amostragem de segunda ordem, em que serão recolhidas duas amostras por período de amostragem, sendo que a segunda terá um atraso de um quarto do período da portadora relativamente à primeira.

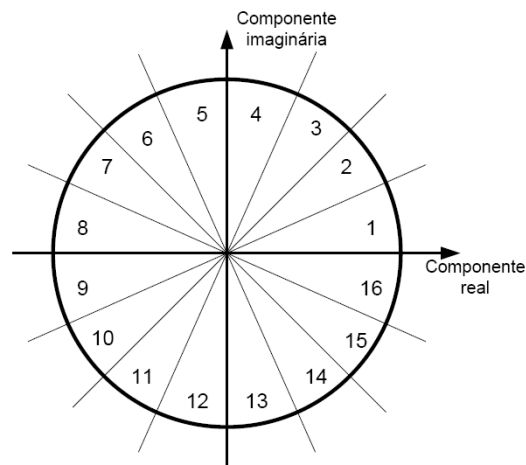
A amostragem será realizada a uma frequência de 8kHz, obtendo-se dessa forma um ritmo de amostragem de 16ksps, ou seja 10 vezes inferior ao caso da amostragem de primeira ordem do trabalho anterior, que recorria a um ritmo de amostragem de 160ksps. Relembrando que o desempenho máximo dos ultra-sons corresponde à frequência de 40kHz e que a sua largura de banda é de 2kHz será necessário um tempo de *bit* mínimo de 0.5ms, ou seja, um mínimo de 20 períodos da portadora por bit. No entanto, utilizar-se-á um tempo de bit de 2ms, de modo a que, nos casos em que vários bits sucessivos apresentem sempre valores lógicos diferentes, a largura de banda dos transdutores não imponha entraves à máxima amplitude do sinal. Caso contrário os

transdutores não terão tempo suficiente para responder à alteração do sinal aos seus terminais. Desta forma, e utilizando o tempo de bit de 2ms, a frequência mínima para a amostragem de segunda ordem deverá ser de 500Hz.

A frequência da portadora, 40kHz, deverá ser múltipla da frequência de amostragem, de modo a que sejam obtidas amostras no mesmo instante de cada bit, caso contrário não será possível efectuar uma desmodulação fiável. O facto de a frequência da portadora ser múltipla da frequência de amostragem irá diminuir os problemas causados por deslocamentos da frequência da portadora. No entanto, o sistema nunca irá ficar completamente imune, uma vez que os relógios que geram a frequência de amostragem e da portadora não são exactamente iguais, pois ambos possuem determinada margem de erro e estão presentes em dispositivos distintos.

A frequência de amostragem de 8kHz é perfeitamente aceitável para a implementação em questão, proporcionando a extracção de blocos de 16 amostras em fase e 16 amostras em quadratura por *bit* do sinal recebido. Estas amostras deverão ser filtradas ou apenas feita a sua média aritmética, de modo a permitir que o algoritmo do detector de inversão de fase efectue o seu processamento por blocos em tempo-real.

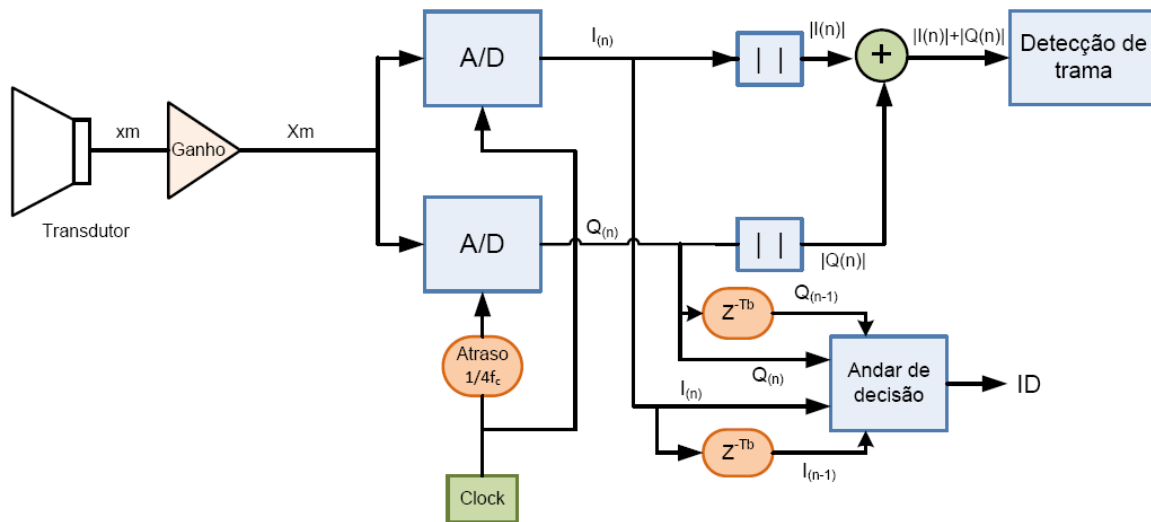
Inicialmente pretendia-se que o detector de inversão de fase efectuassem o cálculo da fase do bit em questão, comparando-a com a do bit anterior, de modo a averiguar se ocorrera ou não transição de nível lógico. Para tal seriam utilizados os valores das componentes em fase e quadratura de ambos os bits para localizar as coordenadas bidimensionais de cada bit. O bit ir-se-ia então encontrar em determinada posição do círculo unitário como mostra a figura 3.17:



**Figura 3.17** - Esquema exemplificativo da divisão das coordenadas bidimensionais.

A figura 3.17 encontra-se dividida em 16 secções, sendo que a cada secção corresponde determinado intervalo da fase do sinal. O algoritmo pretendido deveria determinar em qual das secções o sinal se encontrava e comparar a posição dessa secção com a posição da secção do bit anterior. Caso as secções tivessem localizações aproximadamente opostas, seria considerado que existira transição de nível lógico. Caso as suas localizações fossem próximas o nível lógico não se alterara.

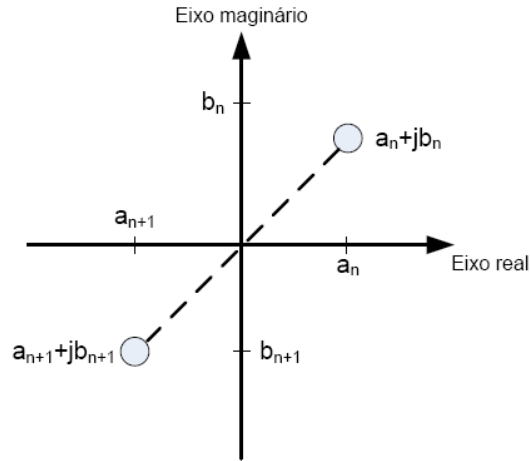
Este método foi idealizado devido ao facto de o MSP não apresentar capacidade de processamento suficiente para determinar a fase do sinal em tempo-real. Se o MSP tivesse capacidade de cálculo suficiente poder-se-ia recorrer a uma tabela com os valores limite de cada secção e encarregar-se-ia o algoritmo detector de inversão de fase de determinar a qual das secções iria corresponder cada *bit*. O diagrama de blocos do desmodulador, incluindo o detector de trama, pode ser encontrado na figura 3.18.



**Figura 3.18** - Diagrama de blocos da desmodulação do sinal recebido.

No entanto, este método de desmodulação iria necessitar ainda de muitos recursos do MSP, o que não iria contribuir para um baixo consumo do dispositivo, para além de não restar intervalo temporal suficiente entre amostragens para realizar em tempo-real as operações necessárias. Houve então necessidade de se encontrar uma alternativa a este processo, compatível com as capacidades do MSP.

O método encontrado para resolver os problemas anteriores baseia-se apenas no tratamento das amostras em fase e quadratura do sinal. Recorrendo ao diagrama bidimensional da figura 3.19, é possível determinar se houve ou não uma alteração da fase do sinal sem necessidade de recorrer a tabelas ou ao cálculo da fase.



**Figura 3.19** - Diagrama bidimensional da localização módulo/fase de dois bits diferentes.

Analisando o diagrama da figura 3.19 verifica-se que é possível detectar a existência de uma transição de fase apenas através dos valores das componentes em fase e quadratura extraídas pela ADC. Efectuando a soma dos módulos das diferenças das componentes em fase e quadratura do sinal em bits sucessivos, será possível averiguar a existência ou não de uma transição de fase, comparando o valor resultante com a soma dos módulos das componentes em fase e quadratura do primeiro bit a comparar. Assim, e caso a expressão (3.15) seja verdadeira, detecta-se a existência uma transição de fase.

$$|a_n - a_{n+1}| + |b_n - b_{n+1}| > |a_n| + |b_n| \quad (3.15)$$

Nos casos em que apenas existe componente real, a decisão será dada por:

$$|a_n - a_{n+1}| < |a_n| \quad (3.16)$$

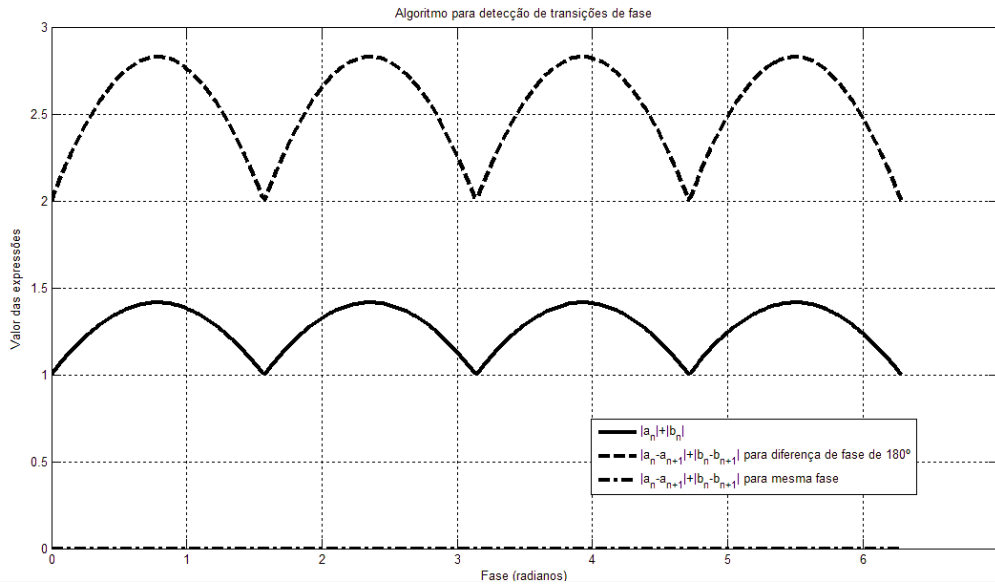
Já nos casos em que apenas existe componente imaginária, a decisão será dada por:

$$|b_n - b_{n+1}| < |b_n| \quad (3.17)$$

Estes últimos casos encontram-se incluídos na expressão (3.15), tendo em conta que para (3.16)  $b_n$  e  $b_{n+1}$  serão 0 e em (3.17)  $a_n$  e  $a_{n+1}$  serão 0.

Os sinais representados por  $a_{indice}$  correspondem às componentes em fase do sinal, após filtragem através de um filtro de média, enquanto os sinais  $b_{indice}$  correspondem às componentes em quadratura, também após filtragem através de um filtro de média. O índice  $n$  diz respeito às amostras do bit actual e o  $n - 1$  às amostras do bit anterior.

A expressão (3.15) foi simulada em *MatLab*, para casos em que existe transição de fase e para casos em que esta não existe. O gráfico dos resultados obtidos pode ser encontrado na figura 3.20.



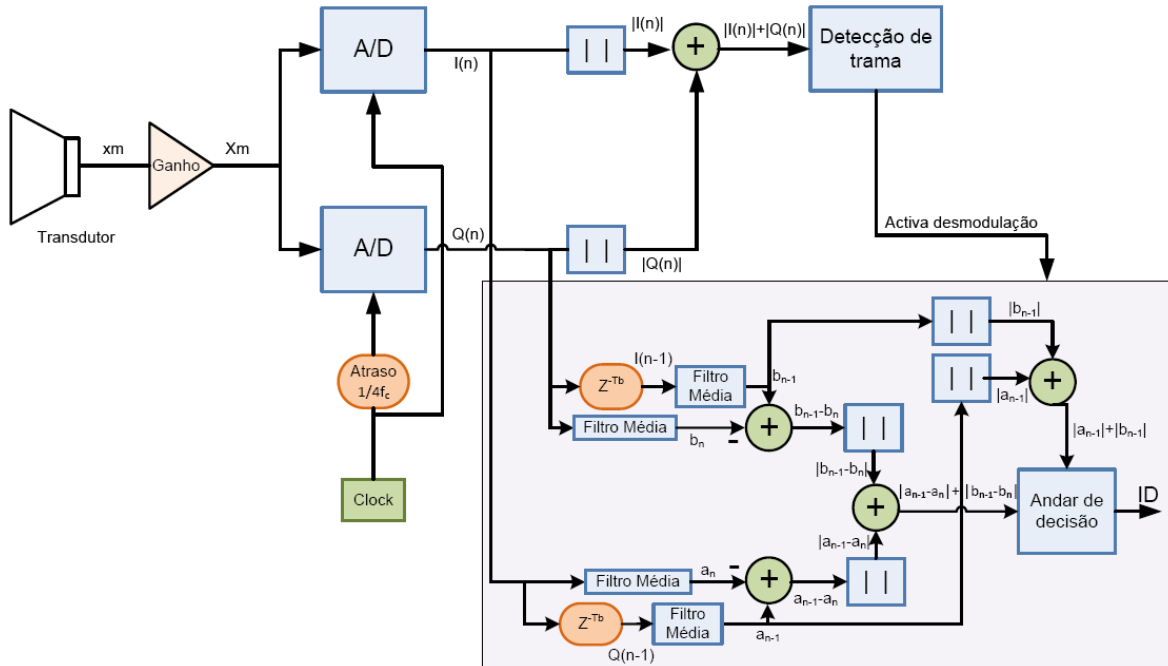
**Figura 3.20** - Gráfico dos testes do algoritmo para detecção de transições de fase.

Através de uma análise à figura 3.20 verifica-se que o algoritmo encontrado para a detecção de transições de fase é viável, uma vez que para bits iguais, em que não existe transição de fase, a diferença mínima entre  $|a_n - a_{n+1}| + |b_n - b_{n+1}|$  e  $|a_n| + |b_n|$  será de 1, tendo em conta que  $|a_n - a_{n+1}| + |b_n - b_{n+1}| > |a_n| + |b_n|$  será sempre uma proposição falsa. Já nos casos em que essa transição de fase existe, a diferença mínima entre ambas as partes da equação será também 1, embora neste caso  $|a_n| + |b_n|$  seja sempre inferior a  $|a_n - a_{n+1}| + |b_n - b_{n+1}|$ , o que torna a proposição verdadeira.

Será então este o algoritmo a implementar para averiguar a existência de uma transição de fase da portadora entre dois bits contíguos. Tendo em conta que a quantidade de recursos do microcontrolador necessária à implementação deste algoritmo em tempo-real é muito inferior aos casos previamente referidos, tudo leva a crer que esta será a melhor das soluções estudadas para a detecção destas transições.

As conclusões anteriores levaram a alterar o desmodulador do sinal, podendo-se encontrar o novo digrama de blocos na figura 3.21.





**Figura 3.21** - Diagrama de blocos final da desmodulação do sinal recebido.

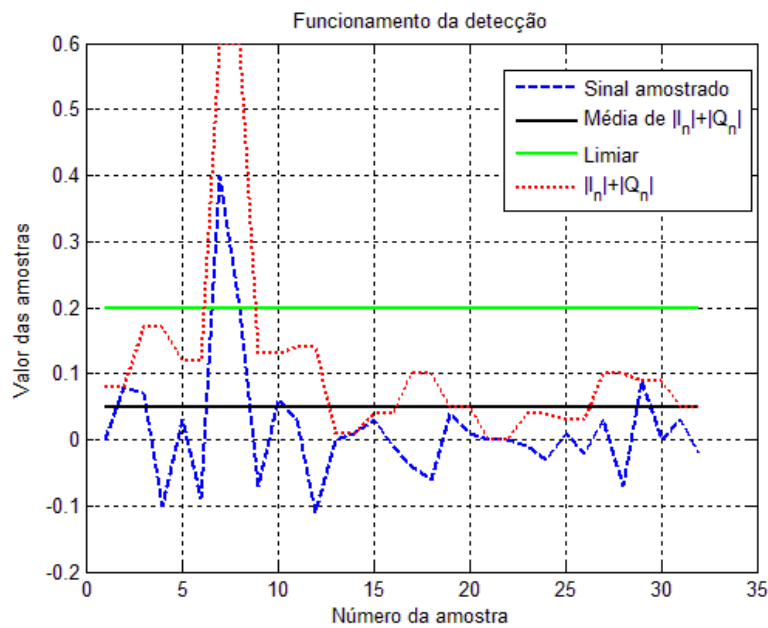
A figura 3.21 mostra o diagrama de blocos da implementação da amostragem de segunda ordem, da detecção de trama, da função (3.15) e do andar de decisão. Estes dois últimos encontram-se na área a cinzento da figura supracitada.

- **Algoritmo para validação da detecção de trama e limitação da distância para desmodulação**

A desmodulação do sinal é iniciada após o algoritmo de detecção de trama detectar que o valor da amplitude da envolvente  $\sqrt{I_n^2 + Q_n^2}$  (figura 3.14) aproximado por  $|I_n| + |Q_n|$ , ultrapassa os limiares do detector de trama. Ora, esta detecção é realizada com base em duas amostras, em fase e quadratura, do sinal recebido, pelo que, aquando da existência de picos de ruído de maior amplitude, podem ser geradas falsas activações, quando não está a ser recebido sinal de nenhum Farol.

O método encontrado para resolução deste problema consiste em fazer um aproveitamento da filtragem de média das componentes em fase e quadratura do primeiro bit e efectuar nova verificação para os limiares de activação da desmodulação. Assim, no caso de ocorrer uma falsa detecção devido a um curto pico de ruído, a desmodulação será cancelada caso a soma do módulo da média das componentes do bit não ultrapasse os limiares. Deste modo, ao invés de se limitar a detecção de trama a apenas uma amostra em fase e uma em quadratura, esta será realizada com base em 16 amostras em fase ( $I_n$ ) e 16 em quadratura ( $Q_n$ ), reduzindo significativamente a probabilidade da ocorrência de falsas detecções. Com este método não há qualquer perda de informação em relação ao bit em questão.

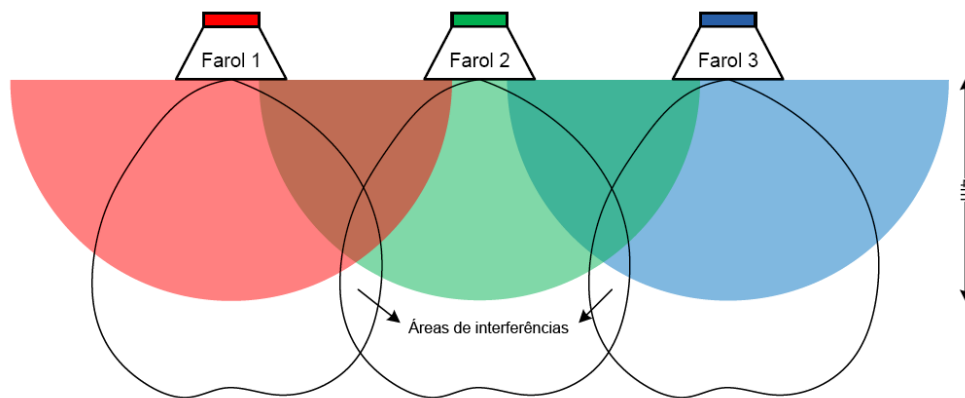
Na figura 3.22 encontra-se exemplificado o funcionamento deste sistema. Foram extraídas 16 amostras em fase e 16 em quadratura, obtendo-se o sinal amostrado. Considerando o valor do limiar de detecção em 0.2, verifica-se que, recorrendo à expressão  $|I_n| + |Q_n|$ , considerando apenas grupos de uma amostra em fase e uma em quadratura, esta ultrapassa o limiar nas amostras 7 e 8, iniciando a desmodulação. Contudo, após recolha de todas as amostras relativas ao primeiro bit, o bit em questão, verifica-se que a média de  $|I_n| + |Q_n|$  deste bit não ultrapassa o limiar. Desta forma a desmodulação será cancelada, dado que se trata de uma falsa detecção de trama.



**Figura 3.22** – Exemplo do funcionamento da validação da detecção de trama.

Tirando partido do algoritmo supracitado, foi ainda idealizada uma forma de limitar a distância a que é efectuada a desmodulação. Isto possibilita que o sistema funcione até uma distância de cerca de 4 metros e que sinais recebidos a distâncias maiores sejam ignorados. Deste modo serão evitadas possíveis interferências entre sinais ou detecção da identificação de um Farol em áreas de acção de outros Faróis.

Um esquema exemplificativo desta função, sem dimensionamento à escala, é apresentado na figura 3.23, em que as zonas a colorido correspondem à zona de acção de cada Farol, zonas essas, limitadas até uma distância de 4 metros. É também possível verificar que as áreas de interferência entre Faróis diferentes são reduzidas. Às linhas provenientes de cada um dos Faróis da figura 3.23 corresponde o diagrama de radiação dos transdutores.



**Figura 3.23** – Exemplo do funcionamento da validação da detecção de trama.

Este algoritmo permite ainda evitar a recepção de sinais provenientes de Faróis a distâncias superiores a 4 metros, distâncias essas, em que a probabilidade de erro da desmodulação é superior. Com isto consegue-se uma melhor eficiência da desmodulação, evitando alguns erros por interferências e por distâncias superiores a 4 metros.

#### • Algoritmo para determinação de bit completo

Tendo em conta que a desmodulação poderá ser iniciada quando um dos Faróis já se encontra em emissão, o detector de trama irá iniciar, desde logo, a desmodulação, mesmo que parte da identificação já tenha sido perdida. Deste modo foi desenvolvido um pequeno algoritmo cujo intuito será evitar que casos semelhantes ao enunciado anteriormente sejam considerados como uma detecção. O algoritmo implementado é similar ao detector de trama, embora neste caso com funções inversas, ou seja, caso se efectue a desmodulação de um bit, em que grande parte das amostras não ultrapassa o limiar, a identificação será descartada e não será enviada ao PDA. Isto permite que apenas sejam consideradas válidas as sequências cuja desmodulação contempla todos os bits da identificação.

Este algoritmo irá também permitir identificar e ignorar os casos, em que por geração de ruído, por exemplo através do abanar de um aglomerado de chaves, o tempo de duração desse ruído é inferior ao tempo de bit. Isto leva a que as amostras finais apresentem valores de amplitude muito baixos, levando a que este algoritmo descarte, desde logo, a identificação obtida.

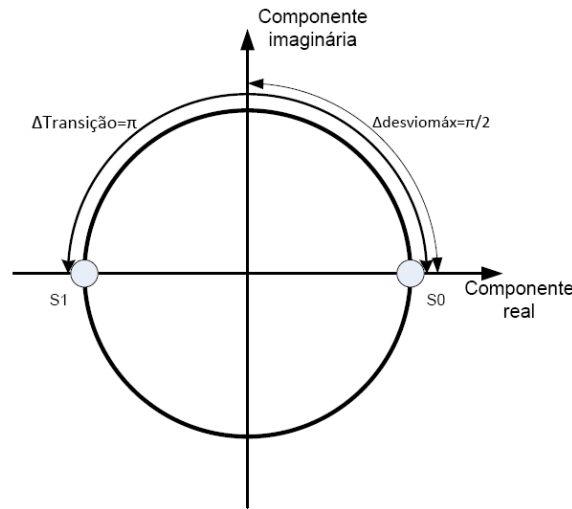
### 3.2.6 – Desvio máximo da portadora

O desvio máximo da frequência admissível pelo sistema, de modo a que a desmodulação seja correctamente efectuada, é um ponto de análise interessante, dado o erro máximo de  $\pm 1\%$  do oscilador do MSP, embora o erro típico deste se encontre em  $\pm 0.2\%$ .

Caso a percentagem de desvio máxima admitida pela frequência da portadora seja inferior ao erro do oscilador do MSP, podem ocorrer erros durante a desmodulação, uma vez que

podem ser detectadas falsas transições devido a estes desvios ou, ao invés, algumas transições não serem detectadas.

São necessários alguns dados para o cálculo da estimativa do desvio máximo admissível pela portadora, como a frequência do sinal a utilizar,  $f_p=40\text{kHz}$ ; o período de bit,  $T_b=2\text{ms}$ ; a frequência do oscilador do MSP,  $f_o=16\text{MHz}$ ; o número de períodos da portadora por bit de dados,  $N_p=80$  e a máxima deslocação da fase num período de bit,  $\Delta d = \frac{\pi}{2} = \frac{1}{4f_c}$ , ou seja, um quarto do período da portadora. A este valor da máxima deslocação de fase admissível corresponde metade do deslocamento de fase teórico de uma transição, ou seja,  $\frac{\pi}{2}$ , como se pode comprovar a partir da figura 3.24.



**Figura 3.24** - Diagrama ilustrativo do desvio máximo admissível pela portadora.

Para se calcular o desvio máximo da portadora são necessários os cálculos intermédios efectuados de seguida:

- Período da portadora:  $f_c = 40\text{kHz} \rightarrow T_c = 25\mu\text{s}$
- Tempo máximo da deslocação:  $\Delta d = \pi/2 \rightarrow T_{\Delta d} = 6.25\mu\text{s}$
- Valor máximo para tempo de bit:  $T_b + T_{\Delta d} = 2\text{ms} + 6.25\mu\text{s} = 2.00625\text{ms}$
- Valor mínimo para tempo de bit:  $T_b - T_{\Delta d} = 2\text{ms} - 6.25\mu\text{s} = 1.99375\text{ms}$

O valor mínimo para a frequência da portadora será dado por:

$$f_{cmin} = \frac{N_p}{2.00625\text{ms}} = 39.875\text{kHz} \quad (3.18)$$

Já o valor máximo para a frequência da portadora será:

$$f_{cmáx} = \frac{N_p}{1.99375\text{ms}} = 40.125\text{kHz} \quad (3.19)$$

A percentagem do desvio máximo da portadora será dado por:

$$Erro_{máx} = \frac{0.00625ms}{2ms} \times 100 = \pm 0.31\% \quad (3.20)$$

Verifica-se que o erro máximo da portadora admissível pelo sistema é de  $\pm 0.31\%$ , correspondente a 125Hz. Este valor é superior ao erro típico do MSP ( $\pm 0.2\%$ ), mas inferior ao erro máximo ( $\pm 1\%$ ), pelo que, com alguns microcontroladores, a taxa de erros devido aos desvios de frequência pode ser muito elevada. Deste modo houve necessidade de encontrar uma solução para obter um relógio com um erro minorado. A solução encontrada foi o recurso ao cristal externo associado ao módulo CC2500 presente no circuito de RF do MSP. Este cristal possui um erro de 40 ppm (partes por milhão), logo, o seu erro é muito inferior ao do oscilador do MSP e ao erro máximo admissível na portadora. É uma solução sem qualquer incremento no custo do sistema actual, bastando configurar o relógio do CC2500 e colocar o sinal numa saída directamente conectada ao MSP, solucionando-se assim os problemas dos desvios da frequência da portadora, relacionados com o oscilador interno do microcontrolador.

Este cristal funciona a uma frequência de 26MHz, sendo que essa frequência será dividida por 2 de modo a ser obtida uma frequência de 13MHz. Isto deve-se ao facto de o microcontrolador funcionar a uma frequência máxima de 16MHz, não permitindo a implementação de um cristal externo que possua uma frequência superior à do MSP.

### 3.2.7 – Efeito de Doppler

O efeito de Doppler pode ser provocado por qualquer movimento relativo entre o Farol e a Estação, o que provoca uma variação da frequência observada pela Estação, aquando da recepção de sinal. Caso a Estação se movimente em direcção ao Farol, a frequência aparente do sinal recebido na Estação é superior à frequência emitida pelo Farol. Caso a Estação se movimente em direcção oposta, a frequência aparente será inferior à frequência emitida. A relação entre estas frequências é dada por:

$$f' = f \left( \frac{v}{v + v_{FE}} \right), \quad (3.21)$$

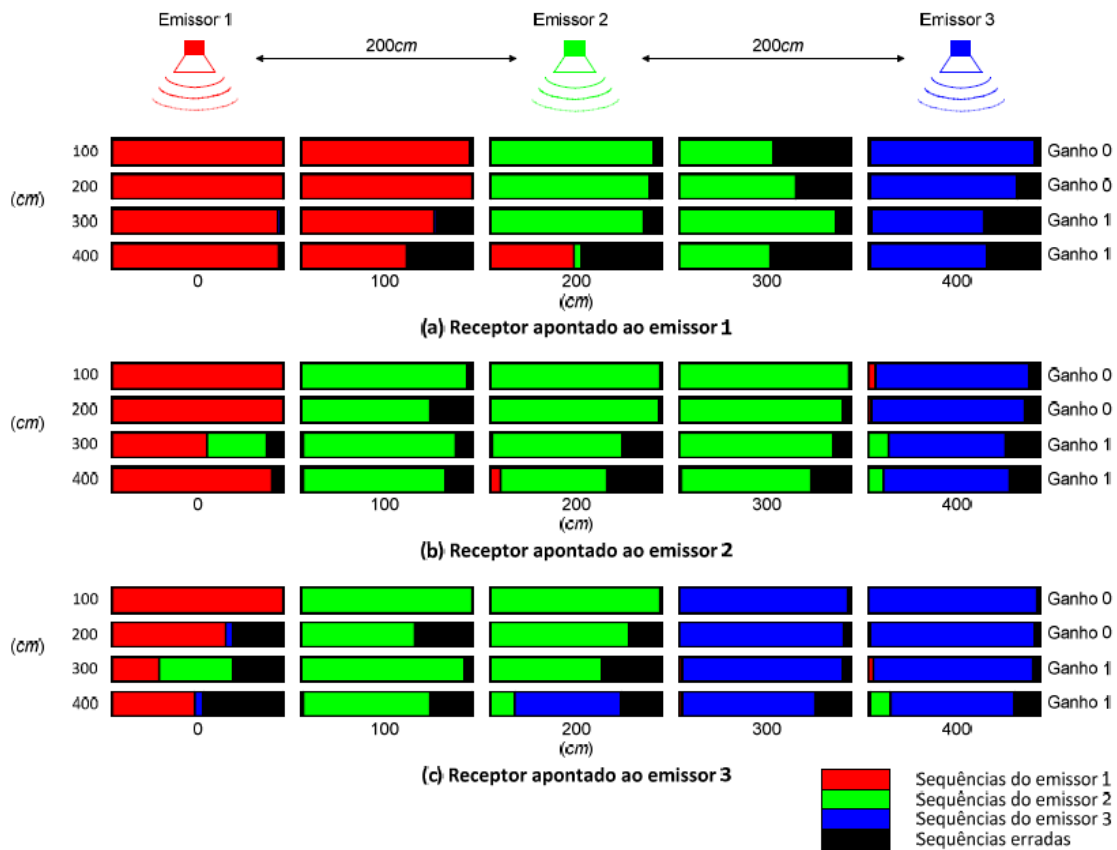
onde  $v_{FE}$  corresponde à velocidade relativa entre o Farol e a Estação,  $v$  é a velocidade do sinal no meio,  $f$  é a frequência de emissão e  $f'$  a frequência aparente na Estação.

Este efeito tem, no sistema, as mesmas consequências que teria uma variação da frequência da portadora. Tendo em conta que o desvio máximo da portadora é de 125Hz, a velocidade relativa máxima para o bom funcionamento do sistema é de  $v_{FE} = 1.06m/s$ . Tendo em conta que a velocidade máxima da locomoção humana relativa ao andar tem o máximo de 2m/s [15], basta que os visitantes não imponham um ritmo demasiado elevado na sua visita para que o sistema funcione correctamente.

O sistema anteriormente desenvolvido [3] apresenta um desvio máximo da portadora superior ao deste novo projecto. Isso deve-se ao facto de anteriormente ser utilizada uma desmodulação diferencial em relação ao último período da portadora. Neste novo sistema, e como o microcontrolador não tem capacidades para realizar o mesmo tipo de desmodulação, a desmodulação diferencial é feita em relação ao último bit, perdendo-se margem de manobra em relação ao desvio máximo da portadora.

### 3.2.8 – Estudo utilizando modulação PSK

Foram realizados alguns estudos anteriores[3] relativos à eficiência da modulação PSK num sistema deste género. Os resultados foram bastante positivos, como se pode verificar na figura 3.25.



**Figura 3.25** - Desempenho da modulação PSK num sistema semelhante [3].

Na figura 3.25 o bloco superior é relativo aos testes em que o receptor se encontra direccionado para o emissor 1, variando a distância e o ângulo, encontrando-se, em alguns casos, em frente a um outro emissor, mas ainda direccionado para o emissor 1. Verifica-se que numa posição frontal ao emissor 1 a quantidade de erros é muito baixa, tendo-se recebido quase em todas as amostras a sequência do emissor 1. É esta a zona em que se pretende obter os melhores resultados, uma vez que para os visitantes que utilizarem este sistema, um dos requisitos será encontrarem-se numa posição aproximadamente frontal à obra, entre 1 e 4 metros. Quando o

receptor se encontra em frente a um dos outros emissores, mas apontando para o emissor 1 conclui-se que, maioritariamente, ou é detectado um erro ou a sequência recebida corresponde ao emissor posicionado na zona frontal ao receptor. O mesmo acontece quando o receptor se encontra direccionado para os outros emissores, concluindo-se que os resultados são reprodutíveis. Assim, para que o sistema tenha o seu desempenho máximo os visitantes dever-se-ão encontrar com a Estação (receptor) direccionada para o Farol (emissor), de preferência numa posição frontal, de modo a diminuir a probabilidade de erros.

De referir que estes resultados foram obtidos para um distanciamento entre emissores de 2 metros. Alguns testes para distanciamento de 1 metro foram efectuados, embora os resultados obtidos demonstrem que, nesse caso, a probabilidade de erro é muito superior. Considerando um distanciamento de 2 metros entre as obras de um museu, conclui-se que este não é abusivo, uma vez que em muitos museus, o distanciamento entre estas é superior.

Daqui se conclui que a modulação PSK é adequada para um sistema deste género, obtendo-se uma baixa probabilidade de erro para posicionamentos frontais entre Estação e Farol. Serão realizados testes semelhantes com o novo sistema, de modo a possibilitar a comparação entre os resultados de ambos os trabalhos.

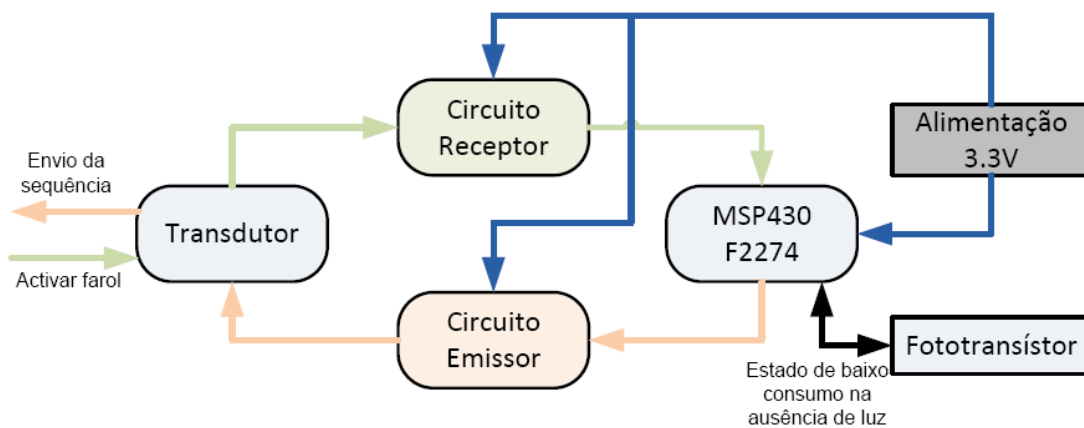
### 3.3 - Farol

Com o Farol pretende-se gerar uma onda sinusoidal com amplitude suficiente para que a Estação identifique o sinal a uma distância de 1 a cerca de 4 metros. Este dispositivo será controlado por um MSP. O Farol deverá enviar um sinal modulado em BPSK através de um transdutor de ultra-sons, sendo essa modulação feita por *software*. Esse sinal irá permitir à Estação, após efectuar a desmodulação do sinal, identificar a obra junto à qual se encontra o Farol.

O Farol irá também possuir um circuito de recepção que identifique sinais de ultra-sons enviados por parte das Estações transportadas pelos visitantes. Caso não se encontre nenhuma Estação nas imediações de um Farol, este, por não detectar nenhum pulso de activação, irá entrar num modo de baixo consumo. Este circuito receptor do Farol terá como objectivo activar o microcontrolador do Farol, caso este se encontre no modo de baixo consumo. A recepção do pulso de ultra-sons deverá colocar o valor de  $V_{dd}$  (3.3V da alimentação unipolar) à saída do circuito receptor, gerando uma interrupção que deverá activar o MSP, iniciando-se a transmissão do sinal com a identificação do Farol.

O Farol deverá possuir também um circuito que lhe indique a possibilidade de desactivar a maior parte das suas funções durante a noite, presumindo que na ausência de luz não haverá ninguém a visitar o museu. Ora, sem visitantes, não haverá necessidade de manter o circuito activo, dado que não será solicitado. Este circuito deverá incluir um fototransístor, responsável por determinar o grau de luminosidade do ambiente em que se encontra o Farol.

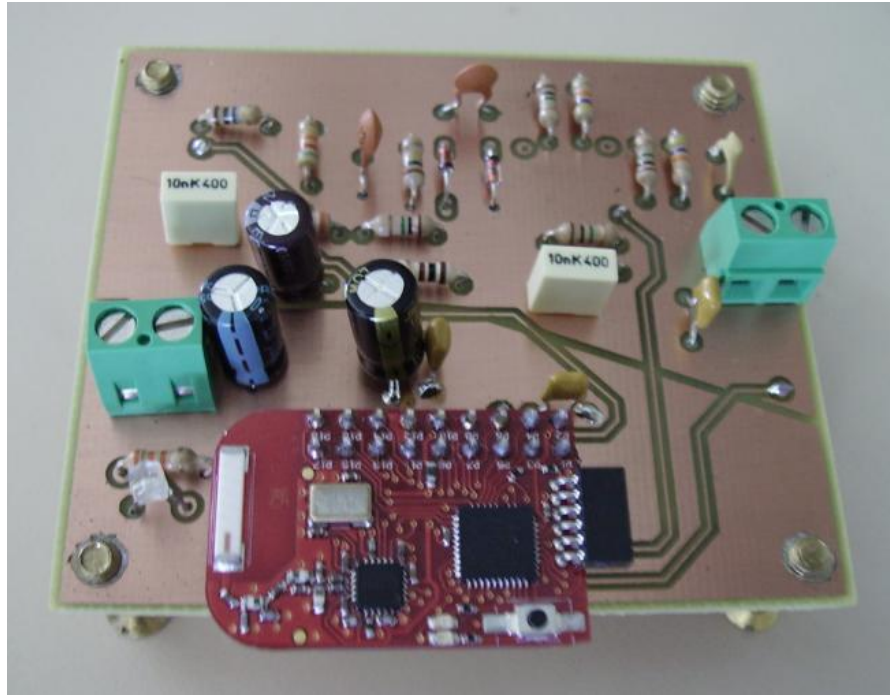
Na figura 3.26 encontra-se o diagrama de blocos do Farol:



**Figura 3.26** - Diagrama de blocos do Farol.

O dispositivo implementado encontra-se ilustrado na figura 3.27. De seguida serão descritas as decisões a nível da implementação do sistema. O esquema completo do Farol pode ser consultado no Anexo B.1 (Esquema eléctrico de um Farol) e os seus componentes e custos encontram-se discriminados no Anexo B.2 (Lista de componentes de um Farol).

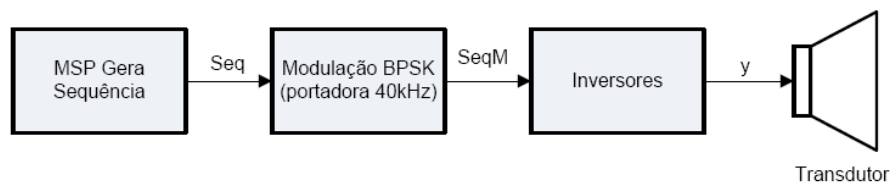




**Figura 3.27** – Dispositivo Farol desenvolvido.

### 3.3.1 - Circuito do emissor de ultra-sons do Farol

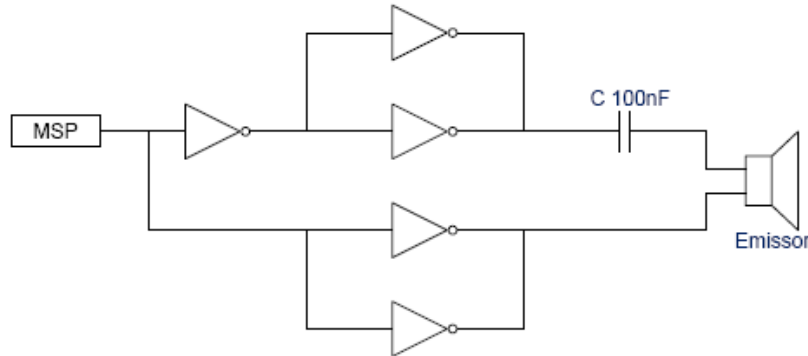
O circuito emissor de ultra-sons do Farol irá receber o sinal modulado, correspondente à identificação da obra e proveniente do MSP, sendo de seguida enviado pelos transdutores sob a forma de ondas ultra sonoras. Sabendo que os transdutores podem receber ondas quadradas às quais corresponde uma diferença de tensão aos terminais dos mesmos, as características piezoeléctricas dos transdutores vão causar a sua oscilação, gerando dessa forma os sinais de ultra-sons. Deste modo é necessário que aos terminais dos transdutores chegue desde logo o sinal modulado em BPSK, o qual será obtido por software, no MSP.



**Figura 3.28** - Diagrama de blocos do envio da identificação.

Como se pode verificar na figura 3.28, o MSP gera a sequência *Seq* a enviar, correspondente à sua identificação. Sabendo-se que os sensores de ultra-sons utilizados têm o seu máximo desempenho a uma frequência de 40KHz, o sinal a gerar no MSP do Farol deverá possuir essa frequência da portadora. A portadora será então modulada com a sequência correspondente à identificação, obtendo-se o sinal BPSK *SeqM*, que será enviado para o circuito emissor. Já no circuito emissor, o sinal vai ser amplificado, uma vez que irá sofrer uma elevada

atenuação no meio desde o envio por parte do transdutor até à sua recepção na Estação. O sinal será amplificado através do circuito da figura 3.29.

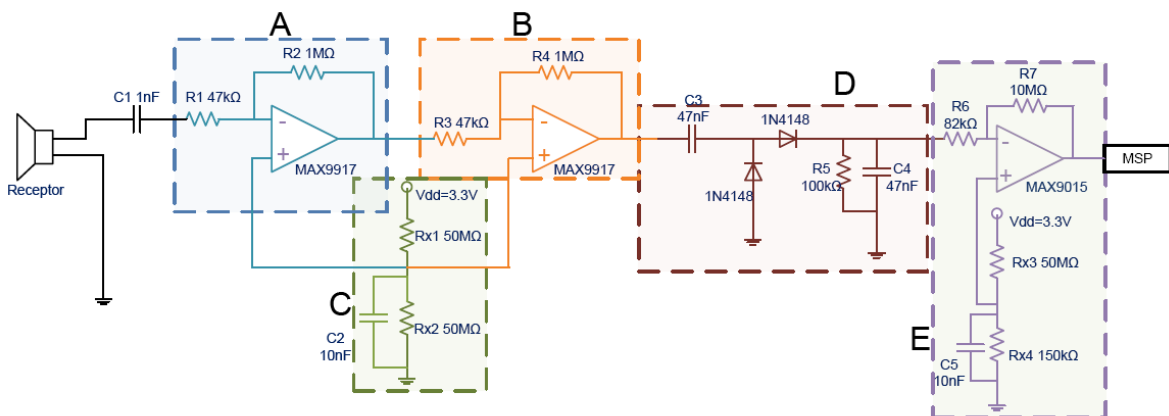


**Figura 3.29** - Esquema do circuito emissor da Estação.

Este circuito permite a obtenção de um sinal de amplitude 6.6Vpp a partir de um sinal de entrada de 3.3Vpp, correspondente à tensão de alimentação do circuito, vendo assim a sua potência quadruplicada. A presença do condensador C permite anular a componente DC do sinal, componente essa que poderia danificar o transdutor caso se apresentasse muito elevada [18]. Com esta amplificação prévia, o efeito da atenuação do meio não se fará sentir de forma tão agressiva, uma vez que o sinal proveniente do emissor de ultra-sons terá uma maior potência, logo a potência do sinal recebido será também maior. São usados dois inversores em paralelo de modo a permitir um maior *drive* de corrente para o transdutor, dado que a corrente fornecida pelo porto do MSP de onde provém o sinal modulado não é suficiente para que os transdutores possam gerar o sinal de ultra-sons de forma eficiente.

### 3.3.2 - Circuito receptor de ultra-sons do Farol

O circuito receptor do Farol será apenas responsável por “acordar” o MSP ao ser recebido um pedido de envio da identificação por parte de um Estação. Este circuito encontra-se esquematizado na figura 3.30.



**Figura 3.30** - Esquema do circuito receptor do Farol.

O sinal de ultra-sons proveniente da Estação será recebido pelo transdutor do Farol, tornando-se no sinal de entrada do circuito presente na figura 3.30. Inicialmente esse sinal irá passar pelo condensador  $C_1$ , cuja finalidade é eliminar a componente DC do sinal. De seguida apresenta-se um primeiro andar de ganho (A), que consiste num amplificador em configuração inversora com um ganho próximo de  $-25V/V$ , o ganho máximo permitido pelo produto ganho/largura de banda do amplificador, que será calculado no ponto seguinte. Um ganho próximo do máximo é o indicado para o Farol, uma vez que se pretende que este active até uma distância de aproximadamente 4 metros, possibilitando um sinal com amplitude considerável.

O ganho do amplificador A é obtido da seguinte forma:

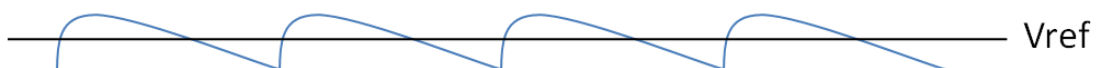
$$A_v = -\frac{R_1+R_2}{R_1} = -\frac{47k+1M}{47k} = -22.3V/V, \quad (3.22)$$

em que  $R_1=47k\Omega$  e  $R_2=1M\Omega$ .

Este amplificador possui uma tensão de referência, obtida em C, de modo a que não se percam as arcadas negativas do sinal, evitando assim a perda de metade da potência do sinal, uma vez que o sinal de entrada se encontra centrado em 0V.

O segundo andar do circuito (B) é um novo andar de ganho, idêntico ao anterior, sendo este necessário uma vez que o ganho obtido até aqui é insuficiente pois o sinal é ainda muito pequeno para que o Farol possa identificar a recepção de um pedido de activação a distâncias próximas de 4 metros. Este novo andar possui também um ganho de tensão de  $-22.3V/V$ , o que dá um ganho conjunto de  $497V/V$ .

À saída deste andar encontra-se um rectificador com condensador de filtragem (D), que permite aplicar à saída uma tensão aproximadamente constante. O último andar (E) consiste num comparador *Schmidt trigger*, cujo propósito é colocar a sua saída à tensão  $V_{dd}$  caso a tensão resultante do divisor resistivo  $R_6$  e  $R_7$  seja superior à tensão de referência proveniente do divisor resistivo de  $R_{x3}$  e  $R_{x4}$ . Esta tensão de referência deverá ser ajustada de modo a que a saída do circuito receptor do Farol seja  $V_{dd}$  quando este receber um sinal a uma distância de até 4 metros. A configuração *Schmidt trigger* permite que pequenas oscilações das tensões provenientes do rectificador não interfiram com a activação do MSP. Este facto poderia levar a várias comutações da saída do comparador, quando o sinal proveniente do rectificador se encontra centrado na tensão  $V_{ref}$ , como se pode verificar através da figura 3.31. Desta forma serão evitadas várias activações do MSP aquando da recepção de um pedido de envio de identificação.



**Figura 3.31** - Sinal à saída do rectificador centrado em  $V_{ref}$ .

O valor das resistências  $R_6$  e  $R_7$  deve ser superior ao valor da resistência  $R_5$  do rectificador, de forma a permitir a descarga do condensador através de  $R_5$ , caso contrário o tempo de descarga será muito grande e a saída do comparador irá permanecer em  $V_{dd}$  quando a entrada do circuito é nula.

Considerando a tensão de referência  $V_{ref} \approx 0.11V$ , proveniente do divisor de tensão composto por  $R_{x3}$  e  $R_{x4}$  e os valores de  $R_6=680k\Omega$  e  $R_7=10M\Omega$ , caso a saída do comparador se encontre à tensão  $V_{dd}$  (3.3V) a tensão necessária, à saída do rectificador, para que a saída comute para a tensão GND será:

$$V_{in} = V_{dd} - \left( \frac{R_6+R_7}{R_6} \times (V_{ref} + V_{in}) \right) = 3.3 - \left( \frac{680k+10M}{680k} \times (0.11 + V_{in}) \right) \cong 0.094V \quad (3.23)$$

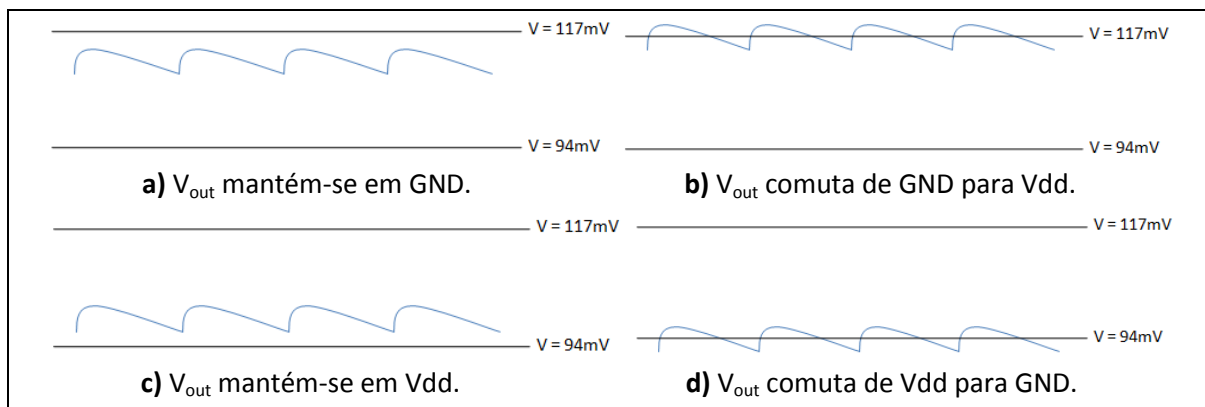
Assim, para a comutação de  $V_{dd}$  para GND será necessário que a tensão à entrada de  $R_6$  (saída do rectificador) seja inferior em 16mV em relação à tensão de referência.

Para que a saída do comparador comute de GND para  $V_{dd}$  a tensão à entrada de  $R_6$  deverá ser de:

$$V_{in} = \frac{R_6+R_7}{R_7} \times V_{ref} = \frac{680k+10M}{10M} \times 0.11V \cong 0.117V \quad (3.24)$$

Neste caso ocorrerá comutação de GND para  $V_{dd}$  quando a tensão à entrada de  $R_6$  é superior em 7mV em relação à tensão de referência. Este é o caso que leva à activação do MSP, o que fará com que este transite de um estado de baixo consumo para o estado activo, no qual será enviada a identificação da obra associada ao Farol em questão.

Na figura 3.32 é possível verificar que apenas ocorre comutação da saída quando, em algum momento, a tensão à saída do rectificador atinge o limiar superior ou inferior da comutação, 0.117 e 0.094V, respectivamente.



**Figura 3.32** - Exemplos da actuação do comparador Schmidt Trigger.

Nos casos a) e b) a tensão à saída do comparador encontra-se inicialmente em GND. Em a), como a tensão à saída do rectificador não atinge o limiar de activação do comparador (o limiar superior, uma vez que a saída do comparador se encontra a GND), a tensão de saída mantém-se

em GND. Já em b), a tensão à saída do rectificador atinge, por momentos, a tensão de activação do comparador, pelo que nesse caso, a tensão à saída do comparador irá comutar para  $V_{dd}$ , activando o MSP. Em c) e d) ocorre algo semelhante, sendo que neste caso a tensão inicial à saída do comparador se encontra em  $V_{dd}$ . Aqui, apenas em d) o limiar de comutação do comparador é atingido, neste caso o limiar negativo, uma vez que a saída do comparador se encontra a  $V_{dd}$ . Sendo assim, em d) a saída do comparador irá comutar de  $V_{dd}$  para GND.

### 3.3.3 - Escolha de componentes

Como um dos pressupostos a cumprir, relativamente ao sistema a implementar, é obter um baixo consumo, dever-se-á ter em atenção a potência consumida por cada um dos elementos constituintes do circuito, para além de outros aspectos importantes que variam de componente para componente.

#### • Amplificadores

Os amplificadores a escolher deverão cumprir os seguintes requisitos de funcionamento:

- Possuir uma tensão de alimentação unipolar de 3.3V;
- Apresentar um produto ganho/largura de banda adequado à sua função;
- Requerer à fonte uma baixa intensidade de corrente.

Foram escolhidos os amplificadores MAX9917 *rail-to-rail*, uma vez que possuem uma baixa corrente requerida à fonte, cerca de 20μA, a sua zona de funcionamento inclui os 3.3V da tensão de alimentação disponibilizada pelas pilhas AAA em conjunto com o conversor DC-DC e possui um produto ganho/largura de banda (GBW) de 1MHz. Como o sinal de trabalho tem uma frequência de 40kHz (B), facilmente se verifica que o ganho em tensão máximo ( $A_{vM}$ ) que se pode obter com este amplificador é de:

$$GBW = A_{vM} \times B \leftrightarrow A_{vM} = \frac{1MHz}{40kHz} = 25V/V \quad (3.25)$$

Possuem ainda modo de *shutdown*, com consumo de apenas 1nA, o que permite que, quando o circuito receptor não é solicitado, estes sejam desactivados, aumentando a eficiência energética do Farol.

#### • Comparador

Em relação ao comparador, o escolhido foi o MAX9015, uma vez que apresenta um consumo de corrente muito baixo, de cerca de 1μA. É também funcional à tensão de 3.3V, pelo que se torna numa opção viável para o projecto.

#### • Resistências

Serão usadas preferencialmente resistências de elevado valor para a criação das tensões de referência, de modo a diminuir a intensidade das correntes que fluem nas mesmas e assim permitir uma diminuição do consumo energético. São os casos das resistências Rx1 e Rx2, de 50MΩ, obtendo-se uma corrente de:

$$I = \frac{3.3V}{100M\Omega} = 33nA \quad (3.26)$$

O mesmo acontece para a tensão de referência gerada por Rx3 e Rx4, na qual se pretende uma tensão muito baixa, logo Rx3>>Rx4. Contudo é possível elevar os valores das resistências, mantendo a proporcionalidade entre ambas, tendo em conta que o valor máximo disponível para Rx3 é de 50MΩ. Assim, Rx4 terá o valor de 150kΩ. A corrente neste divisor é dada por:

$$I = \frac{3.3V}{50.15M\Omega} = 65.8nA \quad (3.27)$$

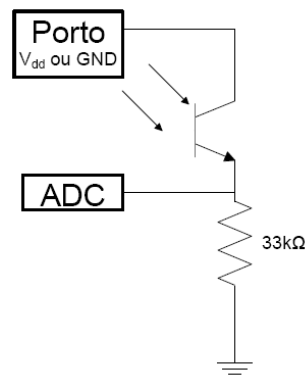
### 3.3.4 – Inclusão de painel solar

Previo-se a inclusão de um pequeno painel solar no Farol, que iria permitir o carregamento das pilhas e/ou reduzir a intensidade de corrente pedida às mesmas, cedendo o painel parte da corrente ao dispositivo. No entanto, os resultados obtidos com uma célula de dimensões relativamente elevadas demonstraram a inviabilidade desta opção, uma vez que no interior de uma sala, na presença de luz artificial, foi obtida uma tensão de 120mV e uma corrente de 0.2mA, o que é sem dúvida insuficiente para qualquer um dos objectivos ambicionados.

### 3.3.5 – Circuito de activação através da luminosidade

O dispositivo Farol irá conter um circuito de activação através da medição da luminosidade ambiente. Durante a noite o museu não deverá ter visitas, pelo que, as luzes deverão estar apagadas. Nesse caso não será necessário que o Farol emita a identificação da sua obra, logo, os seus amplificadores operacionais poder-se-ão encontrar desligados e o MSP com a maioria das suas funcionalidades desactivadas. Este circuito será constituído por uma simples resistência conectada ao emissor de um fototransístor do tipo NPN.

Um fototransístor é o equivalente a um transístor bipolar em que a sua corrente de base é fornecida a partir da luminosidade do ambiente em que o fototransístor se enquadra. Caso a luminosidade ambiente seja suficientemente elevada, a corrente de base do fototransístor será também elevada, entrando o fototransístor no estado activo, podendo até saturar. Caso a luz ambiente seja reduzida, a corrente de base do mesmo também o será, logo o fototransístor estará ao corte ou próximo deste. O esquema do circuito a utilizar encontra-se na figura 3.33:



**Figura 3.33** - Esquema do circuito detector de luminosidade.

A ADC do MSP irá ler periodicamente o valor da tensão no ponto médio do circuito, ou seja, no emissor do fototransistor. Caso este valor se encontre próximo do valor da tensão de alimentação, o Farol permanece ou entra no modo activo, aguardando instruções para enviar a identificação da obra correspondente. Caso o valor lido pela ADC seja próximo de 0, o Farol entra ou permanece num modo de consumo mínimo, possibilitando um aumento da longevidade das pilhas.

Para a escolha do valor da resistência a utilizar, levou-se a cabo um pequeno estudo, que permitisse encontrar a melhor relação entre a corrente a circular no circuito e a sensibilidade do mesmo, de forma a se obter uma corrente baixa no circuito e uma boa sensibilidade. A tabela 3.2 apresenta um resumo do estudo efectuado:

Luminosidade elevada			
R ( $\Omega$ )	Vo (V)	I ( $\mu$ A)	Sensibilidade
22k	3.3	136	Boa
33k	3.3	97	Boa
47k	3.3	82	Razoável
100k	3.3	33	Baixa
150k	3.3	23	Baixa
220k	3.3	16	Baixa
270k	3.3	14	Baixa
330k	3.3	12	Baixa
680k	3.3	6	Má
1M	3.3	5	Má
10M	3.3	2	Má

**Tabela 3.2** - Valores de corrente consumida e sensibilidade do circuito de activação através da luminosidade para valores elevados de luminosidade.

Como se pode verificar pela tabela anterior, é difícil descortinar uma boa relação consumo de corrente/sensibilidade, uma vez que para uma elevada sensibilidade será necessária uma elevada corrente a circular no circuito. Ora, este é um luxo a que não nos podemos dar, uma vez que se pretende minimizar os consumos em cada secção do Farol. A solução encontrada para reduzir a corrente consumida, mantendo a sensibilidade elevada, foi associar a alimentação deste andar do dispositivo a uma das portas do MSP. Desta forma, consegue-se alimentar o circuito apenas quando se pretende efectuar uma leitura através da ADC.

Periodicamente, um dos portos do MSP irá colocar uma tensão de 3.3V na sua saída, que corresponderá à alimentação do circuito de activação, sendo consumida corrente apenas durante o curto período em que a leitura é efectuada pela ADC, voltando o porto, de seguida, a colocar a tensão GND na sua saída. O circuito de activação irá permanecer desligado até que seja solicitada nova leitura a efectuar pela ADC.

Foi então escolhida a resistência de 33k $\Omega$ , dado que apresenta uma boa sensibilidade para a aplicação em questão.

### **3.3.5.1 – Filtragem IIR para valores do fototransístor**

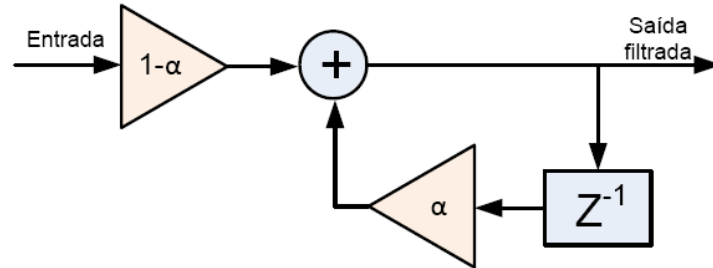
O MSP irá adquirir, periodicamente, o valor da luminosidade no ambiente em que se insere o Farol, podendo alterar ou não o estado do sistema, de baixo consumo para activo ou vice-versa. Isto levanta alguns problemas, como é o caso de alguém tapar momentaneamente o Farol ou a luminosidade da sala em que se insere o sistema ser momentaneamente reduzida devido a sombras ou as nuvens taparem por instantes o sol, o que leva a uma redução da luz incidente no fototransístor. Caso isso aconteça e durante esse período ocorra uma leitura do valor da luminosidade, o sistema irá mudar para o estado de baixo consumo, permanecendo nesse estado até que nova amostra com valor elevado de luminosidade seja obtido, perdendo-se eventuais pedidos por parte de Estações próximas. Ora, não é isso que se pretende, pelo que será forçoso encontrar forma de atenuar o efeito de eventuais amostras que, fortuitamente, possam levar o Farol a mudar para um estado de mais baixo consumo quando este deveria estar activo.

É nesta base que se insere a filtragem IIR. Este tipo de filtragem, levando em conta os valores da entrada e saída actuais e anteriores, permite que o sistema não altere o seu estado quando uma amostra é oposta da anterior, ou seja, caso as amostras anteriores indiquem um elevado nível de luminosidade e uma nova amostra indique um valor baixo, o sistema não irá transitar logo para um modo de baixo consumo, desactivando a emissão e recepção de ultra-sons. Serão indispensáveis mais amostras de baixo valor para que isso aconteça, minorando-se assim a ocorrência de erros fortuitos. No entanto irão existir algumas consequências negativas, como o será no caso de o sistema estar activo e as luzes do museu serem apagadas, o que leva a que o sistema demore algum tempo a reagir. Já em relação ao caso em que o dispositivo está desactivado, na ausência de luz e subitamente estas são ligadas, o sistema deverá reagir rapidamente, pelo que a utilização de um filtro IIR assimétrico foi a solução encontrada.

Será necessário configurar os coeficientes do filtro IIR, para que as amostras da entrada não tenham um peso demasiado baixo ou elevado perante a saída do filtro. Tendo em conta que



o MSP irá efectuar uma leitura da luminosidade de 45 em 45 segundos considera-se que 2 a 5 amostras será uma quantidade razoável para efeitos de evitar erros fortuitos. O esquema do filtro IIR a utilizar, de modo a evitar erros fortuitos, encontra-se na figura 3.34.

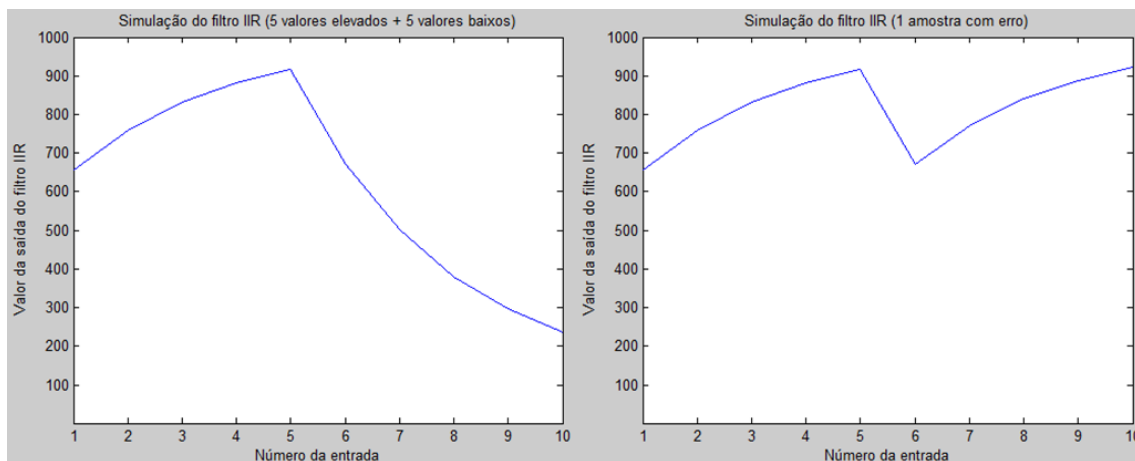


**Figura 3.34** - Diagrama de blocos do filtro IIR.

O filtro da figura 3.34 consiste num filtro passa baixo de 1ª ordem, possuindo, por isso, um pólo real em  $\alpha$ . O valor da saída deste filtro será variável no mesmo domínio da entrada, ou seja, a gama de valores da ADC (0 a 1023).

Caso o sistema se encontre desactivado, deverá bastar uma amostra de valor elevado de luminosidade para que o sistema seja novamente activado. Deste modo obtém-se um sistema “cauteloso” a desactivar e rápido a activar.

Posto isto, o filtro foi simulado em *MatLab* e testada a variação da saída para uma amostra fortuita e para uma série de 5 valores de entrada elevados (1000), seguida de 5 valores de entrada baixos (100), como se pode verificar na figura 3.35. De referir que o valor inicial do filtro se encontra centrado na gama da ADC, ou seja, no valor 511.



**Figura 3.35** - À esquerda: gráfico da simulação do filtro IIR para 5 valores elevados seguidos de 5 valores baixos; à direita: gráfico para valores elevados com uma amostra de erro fortuito ( $\alpha=0.7$ ).

Pela simulação verifica-se que os valores de  $1 - \alpha=0.3$  e  $\alpha=0.7$  se ajustam ao desempenho pretendido. Em 5 amostras de baixo valor, opostas às anteriores de elevado valor, consegue-se uma alteração do estado da saída, considerando o sistema activo quando a saída se

encontra acima de 611 ( $511 + \text{limiar de } 100$ ) e no modo de mais baixo consumo, desactivado, quando a saída do filtro se encontra abaixo de 411 ( $511 - \text{limiar de } 100$ ). Quando ocorre uma única amostra de erro fortuita verifica-se que não existe alteração do estado do sistema, uma vez que o limiar inferior de 411 não é ultrapassado. Apesar disto, irão existir excepções, como será o caso de uma destas amostras fortuitas ocorrer nos primeiros instantes em que o sistema é inicializado. Caso o sistema se encontre desactivado bastará uma amostra de valor superior a 611 para que o sistema seja reactivado.

### 3.3.6 - Ligação do transdutor aos circuitos emissor e receptor

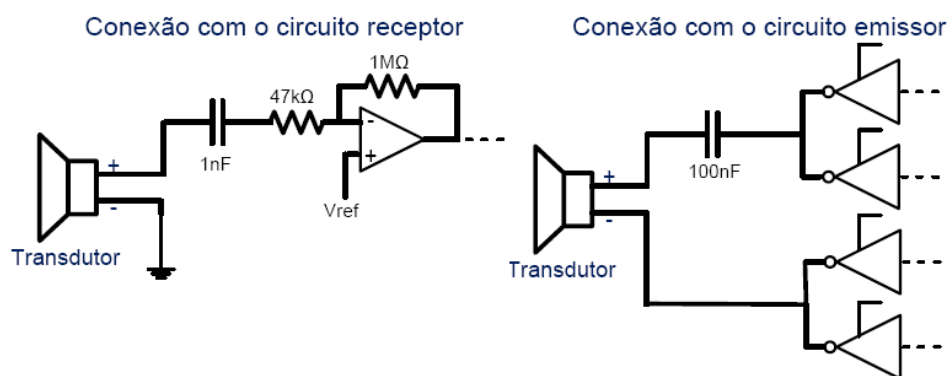
De forma a reduzir o custo do sistema são utilizados transdutores de ultra-sons, ao invés de serem utilizados um emissor e um receptor, cujo custo é superior ao de um transdutor. A escolha incidiu nos transdutores, dado que permitem a recepção e emissão de sinais ultra sonoros, funcionando como emissor e receptor. É então necessário ligar o mesmo transdutor aos circuitos emissor e receptor do Farol, sendo que, aos terminais do transdutor dever-se-á encontrar o sinal pretendido para a função a desempenhar em cada instante.

Quando o Farol está a funcionar no modo de recepção de sinais deverão ser considerados alguns pressupostos para recepção do sinal, como ilustrado na figura 3.36 (Conexão com o circuito receptor):

- O terminal negativo dos transdutores dever-se-á encontrar à massa.
- O terminal positivo deve possuir o sinal a ser tratado no circuito receptor.

Um outro pressuposto deverá ser cumprido aquando da emissão:

- Ambos os terminais deverão possuir as saídas dos respectivos circuitos de inversores, como se verifica na figura 3.36 (Conexão com o circuito emissor).



**Figura 3.36** – Esquema das ligações do transdutor aos circuitos emissor e receptor do Farol, separadamente.

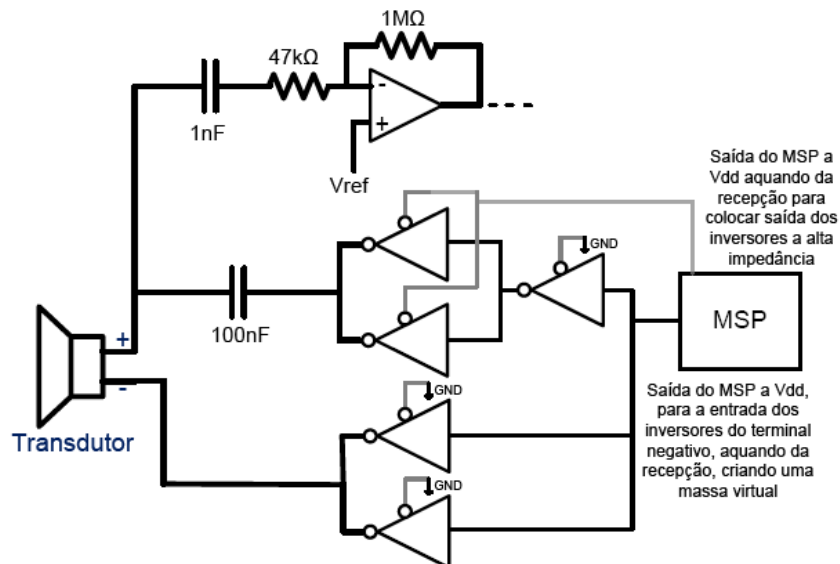
É então importante que não se perca parte ou a totalidade do sinal aquando das tarefas de emissão e recepção, pelo que a solução encontrada foi a utilização de integrados que possuem

portas de activação dos inversores, como é o caso dos inversores *tri-state* MM74HC240WM. De notar que estes inversores possuem um consumo relativamente elevado para o pretendido no Farol, pelo que este será um dos aspectos a melhorar num trabalho futuro.

Sabendo que o integrado MM74HC240WM possui 2 portas de activação e que cada uma controla 4 inversores, será possível controlar separadamente os terminais do circuito receptor da figura 3.29, sendo que um possui 3 inversores e o outro apenas 2. Isto abre a possibilidade de, aquando da recepção de ultra-sons, se evitar a ligação do terminal negativo do transdutor directamente à massa do circuito, bastando colocar a porta de activação dos inversores deste terminal a LOW e programar o MSP para, aquando da recepção de sinais, colocar na entrada dos inversores um sinal que permita que a sua saída se comporte como uma massa virtual. Assim, quer na emissão quer na recepção, estes inversores encontrar-se-ão ligados e a sua porta de activação dever-se-á encontrar a LOW (activa à tensão GND) logo, esta porta de activação poderá ser conectada directamente à massa do circuito. Com isto, as incompatibilidades no terminal negativo do transdutor estão solucionadas.

Em relação ao terminal positivo do transdutor, basta que, aquando da recepção de sinais, a porta de activação dos inversores deste terminal seja colocada a HIGH (à tensão  $V_{dd}$ ), o que leva a que as saídas dos inversores sejam colocadas em alta impedância, não se perdendo o sinal recebido pelos transdutores. Aquando da emissão de ultra-sons não serão necessários quaisquer cuidados, uma vez que o terminal negativo se encontra apenas ligado ao circuito emissor e no terminal positivo o circuito se encontra desligado, dado que os seus operacionais se encontram no estado de *shutdown*. A solução encontrada e esquematizada para ligação do transdutor a ambos os circuitos pode ser verificada na figura 3.37.

#### Conexão com os circuitos emissor e receptor



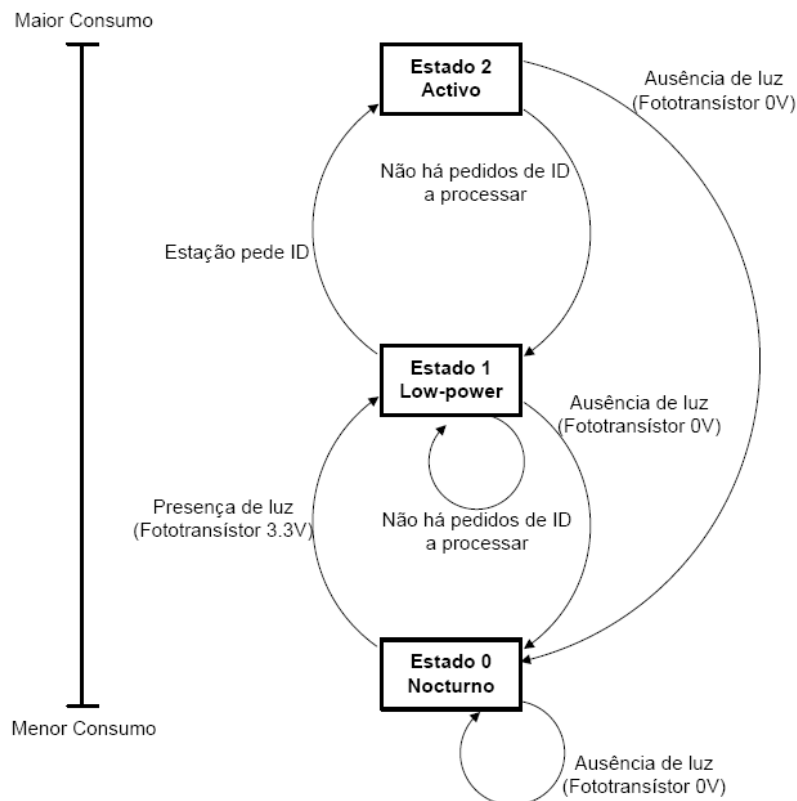
**Figura 3.37** – Esquema das ligações do transdutor ao Farol.

### 3.3.7 - Estados de energia do Farol

Ambicionando-se que o Farol seja um dispositivo com grande autonomia, será necessário controlar os seus consumos, evitando que estes sejam elevados principalmente quando a sua utilização não é justificada. Assim, o Farol irá possuir 3 estados de energia:

- Estado activo do Farol, em que todas as suas funcionalidades se encontram disponíveis, logo o seu consumo será maior.
- Estado de baixo consumo, intermédio, em que o Farol, por não ter sido solicitado, espera por um pedido de identificação.
- Estado nocturno, de mais baixo consumo, que reduz o consumo do dispositivo ao mínimo permitido para manter as funções essenciais a esse estado.

Este último estado é controlado por um fototransistor, que mede a luminosidade do meio, e caso esta seja reduzida, o circuito entra nesse estado de mais baixo consumo. O diagrama de estados de energia do Farol, ordenado por consumos, pode ser encontrado na figura 3.38.



**Figura 3.38** - Diagrama de estados de energia do Farol.

Analisando a figura anterior, verifica-se que ao Estado 0 corresponde o estado nocturno, em que a maioria das funcionalidades do sistema e do microcontrolador se encontram desligas. Ao Estado 1 corresponde o estado de baixo consumo, em que o dispositivo se encontra enquanto é aguardada uma interrupção gerada pela recepção de um pedido de activação e ao Estado 2

corresponde o estado activo do sistema. O Farol poderá migrar para o estado nocturno a partir de qualquer outro estado, bastando para isso que a luminosidade ambiente seja suficientemente reduzida. O sistema não irá sair do Estado 0 enquanto a luminosidade ambiente não for suficiente, migrando, caso o seja, para o Estado 1. Caso o Farol receba um pedido de activação quando se encontra no Estado 0, este não será detectado uma vez que os *opamps* se encontram em modo de *shutdown*.

Ao ser ligado, o sistema irá entrar desde logo no Estado 2, o estado activo, sendo que irá passar ao Estado 1, de baixo consumo, até que seja recebido um pedido de activação proveniente de uma Estação. Se o sistema se encontrar no Estado 1 manter-se-á nesse estado até receber um pedido de uma Estação. Caso seja recebido um pedido o sistema irá migrar para o Estado 2, activo, de modo a permitir o envio da identificação da obra.

Procedeu-se à análise dos consumos teóricos do Farol em cada um dos estados, tendo sido recolhida a informação que consta na tabela 3.3.

Componentes	Consumo no Estado Activo	Consumo no Estado low-power	Consumo no Estado Nocturno
<b>MSP430F2274</b> (Microcontrolador)	500 $\mu$ A	0.7 $\mu$ A	0.7 $\mu$ A
<b>MAX1675</b> (Conversor DC-DC)	16 $\mu$ A	16 $\mu$ A	16 $\mu$ A (0.1 $\mu$ A*)
<b>MAX9917</b> (Amplificadores)	40 $\mu$ A	40 $\mu$ A	2 nA
<b>MM74HC240WM</b> (Inversores <i>Tri-State</i> )	80 $\mu$ A	80 $\mu$ A	80 $\mu$ A
<b>MAX9015</b> (Comparador)	1 $\mu$ A	1 $\mu$ A	1 $\mu$ A
<b>Transdutores</b>	ON=4mA OFF $\approx$ 0 $\mu$ A	$\approx$ 0 $\mu$ A	$\approx$ 0 $\mu$ A
<b>Tensões de referência</b>	0.1 $\mu$ A	0.1 $\mu$ A	0.1 $\mu$ A
<b>Total</b>	4637.1 $\mu$ A	137.8 $\mu$ A	97.8 $\mu$ A
<b>Duração das pilhas</b> Carga: 2000mA/h	18 dias	603 dias (20 meses)	853 dias (28.4 meses)

**Tabela 3.3** – Consumos dos diferentes componentes do Farol em cada estado (\*este consumo ocorre no estado de *shutdown* do conversor, não tendo sido explorado neste trabalho).

Efectivamente, verifica-se que o estado activo é aquele que apresenta um maior consumo. O estado low-power, de baixo consumo, apresenta um consumo muito menor que o estado activo, sendo que o consumo mínimo surge quando o Farol se encontra no estado nocturno, o qual tem muita influência para um aumento do tempo de vida das pilhas.

Analisando os tempos de duração de duas pilhas NiMH com capacidade individual de 1000mA/h, conclui-se que caso o Farol se encontre todo o tempo no estado activo, a duração das pilhas, quando aplicadas ao Farol, será de 18 dias. Nos estados de baixo consumo esse tempo irá aumentar para 20 meses no estado *low-power* e 28.4 meses no estado nocturno. Trabalhando o

sistema de modo a que este passe a maior parte do tempo num dos estados de baixo consumo, conseguir-se-á um tempo de duração das pilhas superior a vários meses.

### **3.3.8 - Organização do *software* do Farol**

O Farol contém dois blocos essenciais a nível de software. O primeiro prende-se com a sua principal função, o envio da identificação através de ultra-sons aquando da recepção de um pedido de identificação por parte da Estação. Possui também uma função dedicada à quantificação da luminosidade do meio em que se encontra o Farol, que deverá colocar todo o sistema num estado de consumo mínimo, o estado nocturno, caso a luminosidade seja reduzida.

A flowchart do Farol pode ser consultada na figura 3.39:

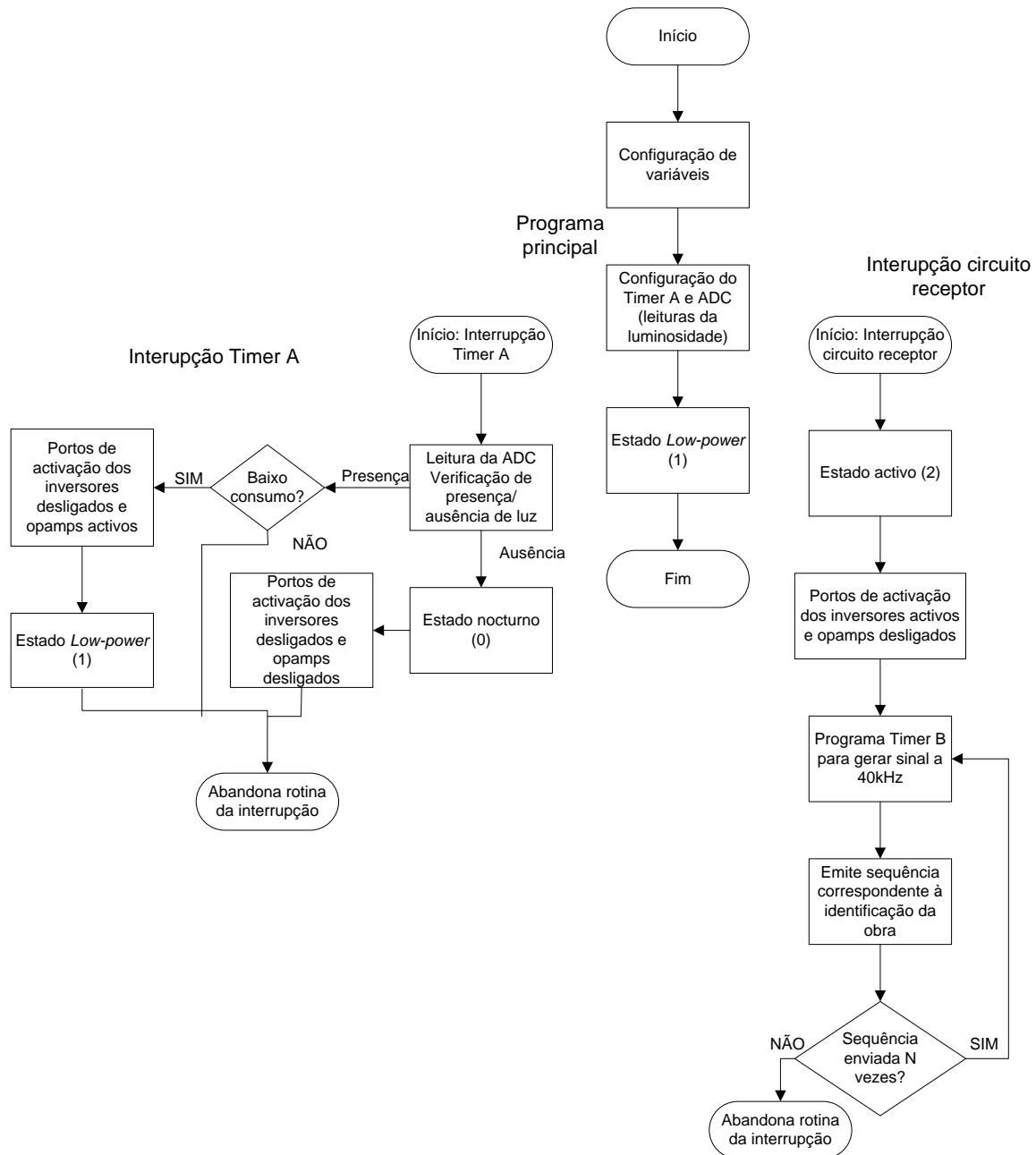


Figura 3.39 - Flowchart do software do Farol.

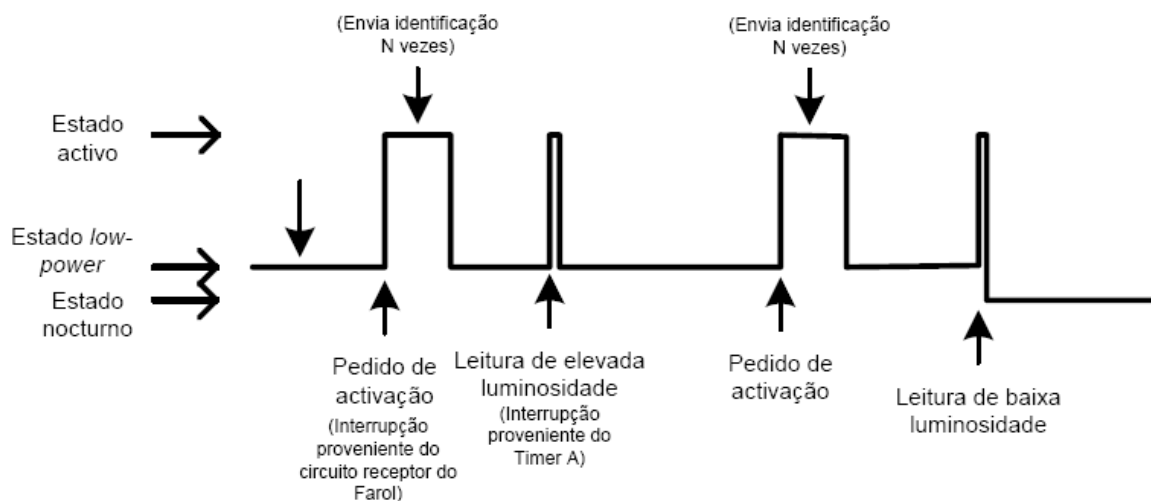
Analisando a *flowchart* do Farol, verifica-se que quando o sistema é ligado são configuradas as variáveis do mesmo e configurados o *Timer A* e a ADC. O *Timer A* será o responsável por, periodicamente, gerar uma interrupção que irá dar uma ordem de leitura à ADC, de modo a que esta recolha e guarde o valor actual da luminosidade ambiente. Este *Timer* realiza a contagem a partir do relógio VLOCLK do MSP, que funciona a 12kHz, com um consumo muito baixo, de cerca de 0.5µA. Isto permite que, durante a noite, quando o sistema está no modo nocturno, o relógio permaneça activo admitindo a activação periódica do MSP para leituras da luminosidade, tudo isto com um consumo muito baixo. Caso os valores lidos indiquem que a luminosidade é reduzida, todo o sistema será colocado ou permanecerá no estado nocturno, ou seja, o modo de mais baixo consumo, permitindo que o consumo do dispositivo seja o mínimo

possível. Neste modo os valores da luminosidade irão continuar a ser actualizados periodicamente, em intervalos de aproximadamente 45 segundos, de modo a que quando os valores de luminosidade forem suficientemente elevados o sistema seja colocado de novo no estado activo.

Assim, no estado nocturno, apenas poderão existir interrupções provenientes do *Timer A*. No estado *low-power*, o estado intermédio, poderão ocorrer para além das anteriores, interrupções provenientes do circuito receptor. O sistema encontrar-se-á no estado activo o mínimo tempo possível.

No estado *low-power*, quando o circuito receptor detecta sinais de ultra-sons superiores a determinado limiar, é despoletada uma interrupção que indica a recepção de um pedido de identificação por parte de uma Estação. Nesse momento o Farol irá correr uma rotina que gera um sinal modulado a 40kHz, a partir do *Timer B*, sendo a contagem do *timer* baseada no *clock* do cristal externo. Este sinal contém a identificação da obra a que o Farol está associado, e será enviado para o meio exterior através dos transdutores de ultra-sons, ocorrendo tudo isto já no estado activo. A identificação será enviada N vezes com um intervalo aleatório entre cada envio. Terminada esta rotina o sistema volta ao estado de baixo consumo, em que aguarda por nova interrupção.

Na figura 3.40 encontra-se um diagrama temporal do funcionamento do Farol. Este encontra-se inicialmente no estado de baixo consumo e ao receber um pedido de activação é gerada uma interrupção que coloca o sistema no estado activo enviando a identificação do Farol. De seguida o sistema volta ao estado de baixo consumo. Na mesma figura podem ser encontradas as interrupções geradas pelo *Timer A* para leitura do valor da luminosidade, sendo que se esta for suficientemente baixa o sistema transita para o estado nocturno, no qual irá continuar a efectuar leituras da luminosidade periodicamente.



**Figura 3.40** – Diagrama temporal do funcionamento do Farol.

Esta construção de software permite uma elevada eficiência energética do dispositivo, uma vez que possui dois estados de consumo reduzido. O estado nocturno é activado aquando da existência de baixa luminosidade no meio. Este estado permite manter, a nível do MSP, apenas o *Timer A*, o oscilador VLOCLK e o nível lógico das portas em funcionamento. O estado de baixo



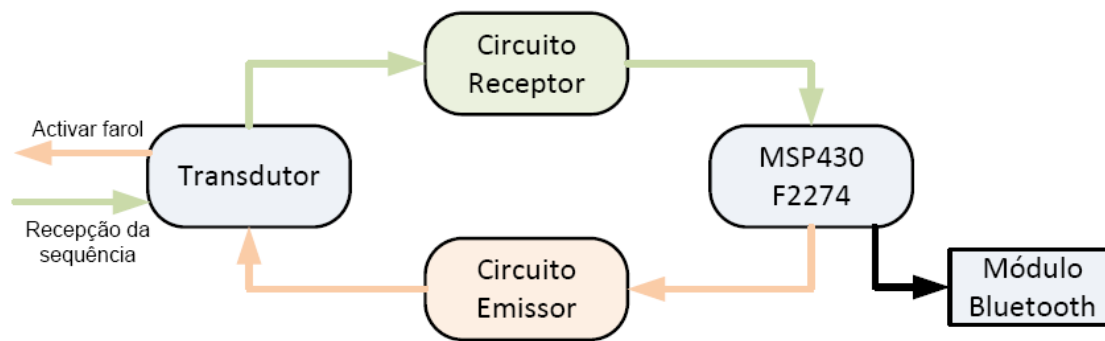
consumo possui as mesmas funcionalidades do estado anterior, para além dos amplificadores operacionais, que deverão estar activos durante o dia a aguardar a recepção de um pedido de identificação. Desta forma, caso o Farol não seja muito solicitado por parte da Estação, tende a encontrar-se no estado *low-power* a maior parte do tempo no período diurno.

De referir ainda que, no estado activo, aquando do envio da identificação, os *opamps* serão colocados no estado de *shutdown*, desactivando o circuito receptor e diminuindo o consumo do Farol.

### 3.4 – Estação

A Estação será, tal como o Farol, controlada por um MSP. Este será o responsável por, periodicamente, enviar um pulso de sinais de ultra-sons, de forma a activar os Faróis localizados no interior da área abrangida por esse pulso. Para isso a Estação irá contar com um circuito emissor de ultra-sons, sendo que neste caso não será necessário qualquer tipo de modulação, uma vez que o circuito receptor do Farol não fará a desmodulação do pulso recebido. Este pulso irá servir apenas para activar o MSP, caso a amplitude do sinal que chega ao Farol seja suficientemente elevada para que, após tratamento do sinal recebido, este seja activado através de uma interrupção gerada no circuito receptor do Farol.

Por outro lado, a Estação deverá ser capaz de receber um sinal de ultra-sons modulado em BPSK, correspondente à identificação de uma das obras, e efectuar a sua desmodulação DBPSK de modo a recuperar essa identificação. De seguida essa identificação será enviada para o PDA, através de um módulo *Bluetooth*, como se pode verificar analisando o diagrama de blocos da Estação presente na figura 3.41.



**Figura 3.41** - Diagrama de blocos da Estação.

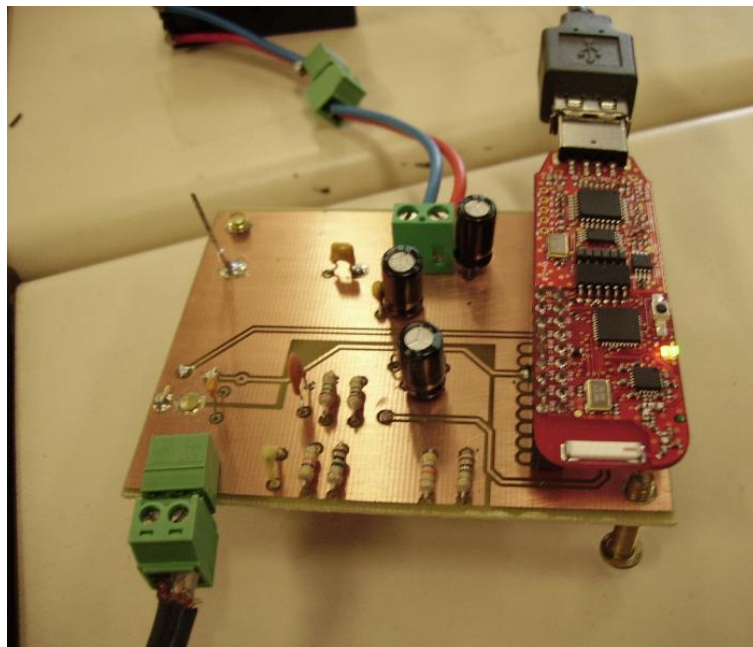
O processo de recepção e desmodulação do sinal proveniente do Farol possui três fases essenciais, referidas na figura 3.42. A primeira das quais consiste na amplificação, via hardware, do sinal  $xm$  recebido pelos transdutores. Esse sinal já amplificado,  $Xm$ , será amostrado à frequência de 8kHz, através de uma amostragem de segunda ordem, obtendo-se o sinal  $Xa$ , correspondente às componentes em fase e quadratura de cada instante de amostragem do sinal  $Xm$ . Será então efectuada a detecção de trama e, caso esta seja detectada, iniciar-se-á a desmodulação e recuperação da identificação,  $Seq$ , no andar de decisão. O diagrama completo da amostragem e desmodulação pode ser encontrado na figura 3.21.

A Estação deverá efectuar correctamente a desmodulação e recuperação da identificação para distâncias compreendidas entre 1 e 4 metros.



**Figura 3.42** - Diagrama de blocos para recepção e desmodulação do sinal modulado.

O dispositivo implementado e em funcionamento encontra-se ilustrado na figura 3.43. De seguida serão abordados alguns aspectos de relevo a nível de decisões e implementação do sistema. O esquema completo da Estação poderá ser consultado no Anexo B.4 (Esquema eléctrico de uma Estação) e os seus componentes e respectivos custos encontram-se discriminados no Anexo B.5 (Lista de componentes de uma Estação).



**Figura 3.43** – Dispositivo Estação desenvolvido.

### 3.4.1 - Circuito emissor da Estação

O circuito emissor da Estação é, em termos de hardware, idêntico ao circuito emissor do Farol. As diferenças encontram-se a nível do sinal enviado. No caso do Farol, o sinal gerado via software pelo MSP encontra-se modulado em BPSK, de forma a permitir o envio da identificação codificada de uma obra. Para a Estação tal não será necessário, uma vez que o sinal enviado por esta não possui qualquer tipo de informação codificada podendo, por isso, ser gerado apenas um pequeno pulso através de um dos *timers* do seu MSP. Este sinal será apenas responsável por activar os Faróis de modo a que estes entrem no estado activo e enviem a sua identificação. Deste modo, uma pequena sequência de ondas quadradas geradas no MSP da Estação bastará para tal.

### 3.4.2 - Circuito receptor da Estação

À saída do circuito receptor da Estação há necessidade de se obter um sinal semelhante ao recebido no transdutor da Estação, mas com uma maior amplitude e com o mínimo de ruído possível. Na Estação será necessário efectuar a desmodulação do sinal recebido, pelo que será importante conservar algumas características do mesmo, como a frequência da portadora e as variações de fase, de modo a que no MSP seja possível efectuar uma correcta amostragem do sinal e sem grandes desvios que possam resultar em erros.

Este circuito receptor apresenta dois andares de amplificação semelhantes aos projectados para o Farol. A diferença encontra-se nos andares seguintes, uma vez que neste caso não será necessário o recurso a um rectificador de onda e a um comparador, já que não se pretende apenas detectar quando é recebido um sinal, mas, também, recuperar toda a informação nele modulada. Deste modo será necessário manter a componente AC (*Alternating Current*) do sinal, de modo a que possa ser efectuada a desmodulação do mesmo. Na figura 3.44 é apresentado um esquema do circuito em questão, onde A e B correspondem aos andares de amplificação, com um ganho máximo possível de 25V/V e a C corresponde a criação da tensão de referência responsável por evitar a perda das arcadas negativas do sinal recebido.

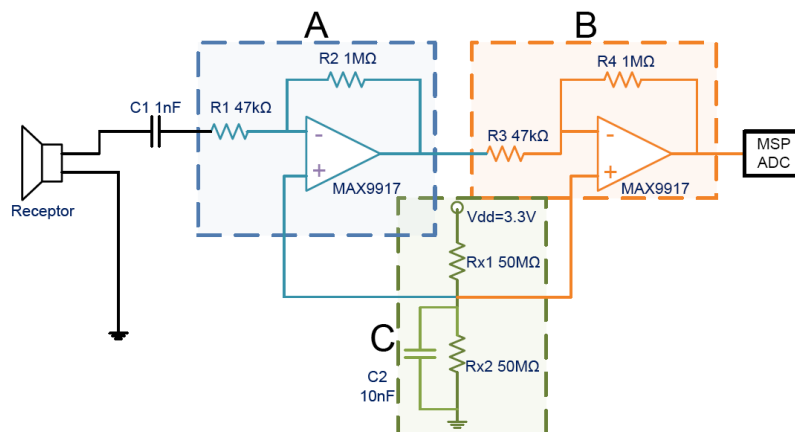


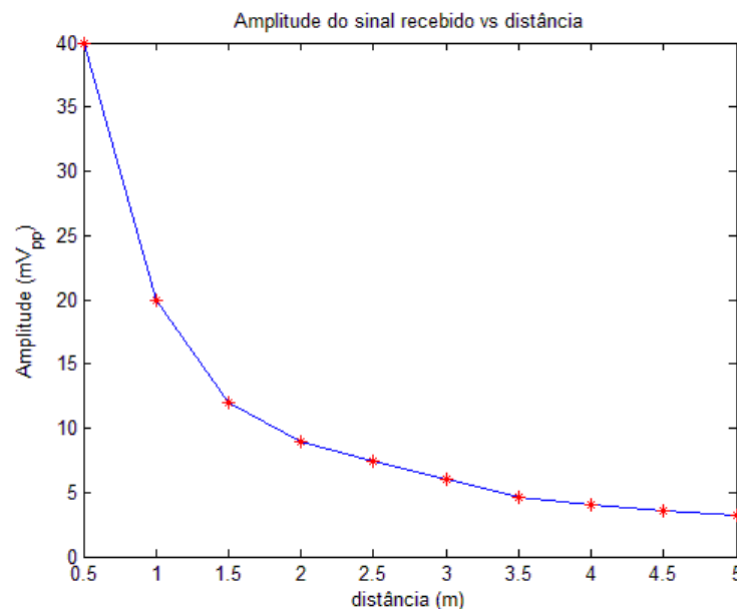
Figura 3.44 - Esquema do circuito receptor da Estação.

### 3.4.3 – Quantificação do ganho necessário à amostragem do sinal

Procedeu-se à medição da amplitude do sinal recebido directamente nos terminais de um transdutor, aquando do envio de uma sinusóide por parte de um outro transdutor. Com isto pretende-se determinar qual o ganho que é necessário aplicar ao sinal para separações entre Farol e Estação de 1 a 4 metros. A amplitude do sinal enviado é igual à amplitude prevista para o sinal enviado por cada um dos dispositivos, ou seja, 6.6Vpp. Na tabela 3.4 é possível encontrar os valores obtidos.

Distância (m)	Amplitude (mVpp)
0.5	40.0
1.0	30.0
1.5	12.0
2.0	9.0
2.5	7.4
3.0	6.0
3.5	4.6
4.0	4.0
4.5	3.6
5.0	3.2

**Tabela 3.4** - Amplitude do sinal recebido pelo transdutor, variando a distância entre o Farol e a Estação. O sinal emitido foi uma sinusóide com amplitude 6.6Vpp e frequência 40kHz.



**Figura 3.45** – Gráfico da amplitude do sinal recebido em função da distância.

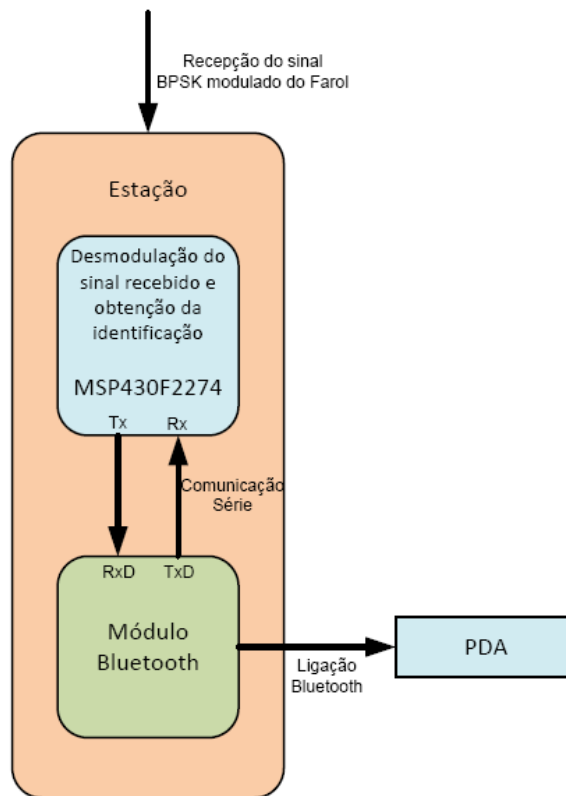
Analisando a tabela a figura supracitadas, verifica-se que aumentando a distância entre o emissor e o receptor, a amplitude do sinal no receptor diminui. Considerando que a distância a que o sinal à saída dos amplificadores deve saturar corresponde a 2 metros, será necessário o seguinte ganho nos amplificadores, para se obter uma tensão de 3.3Vpp à saída do circuito receptor:

$$A_v = \frac{3.3V}{0.009V} \cong 367V/V \quad (3.26)$$

Este ganho é necessário devido ao facto de, para maiores distâncias, a SNR ser relativamente baixa, o que pode originar um maior número de erros.

### 3.4.4 – Comunicação Bluetooth com PDA

Uma das aplicações a que o dispositivo Estação implementado neste trabalho se destina é o de enviar a identificação recuperada, da obra que o visitante se encontra a observar, para um PDA. Este poderá, num trabalho futuro, associar a identificação a alguns conteúdos multimédia. A comunicação da identificação da obra será feita através de um módulo *Bluetooth*, integrado na Estação. Na figura 3.46 encontra-se o diagrama de funcionamento desta secção do sistema.



**Figura 3.46** - Esquema de funcionamento da comunicação de identifições.

#### 3.4.4.1 -Escolha do módulo *Bluetooth* com comunicação série

Hoje em dia o *Bluetooth* [14] é muito utilizado para comunicação entre sistemas electrónicos. Alguns exemplos disso mesmo são as impressoras, ratos, teclados, máquinas fotográficas digitais, PDAs e telefones sem fios. Todos eles, em alguns casos, utilizam o *Bluetooth* como meio de comunicação *standard*. O *Bluetooth* permite evitar o recurso a cablagem para transferência de dados, pelo que se torna num método mais cómodo para efectuar comunicações. É também essencial do ponto de vista em que, para sistemas localizados a distâncias superiores a 100 metros, os custos da cablagem para transmissão de dados podem ser exageradamente elevados. Como vários módulos *Bluetooth* existentes cobrem essas distâncias, tornam-se numa solução mais económica.

O *Bluetooth* funciona a uma frequência de 2.4GHz, sendo que consegue ritmos de transmissão superiores a 3Mbps, no caso da tecnologia *Bluetooth* 2.0. Neste trabalho não será necessário um ritmo de transmissão muito elevado, uma vez que apenas se pretende efectuar a transmissão da identificação das obras, pelo que apenas alguns bits serão transmitidos.

Os dispositivos *Bluetooth* dividem-se ainda em várias classes, consoante a distância a que conseguem propagar a informação. Essas classes são a classe 1, cuja potência de saída consegue atingir os 100mW (20dBm), tendo um longo alcance, superior a 100 metros; a classe 2, porventura a mais comum, cuja potência de saída atinge os 2.5mW (4dBm), sendo utilizada para transmissões de médio alcance, superiores a 10 metros e a classe 3, a menos comum, em que a potência de transmissão é de cerca de 1mW (0dBm), sendo utilizada para transmissões de curto alcance, de cerca de 1 metro. Um resumo destas classes pode ser encontrado na tabela 3.5:

Classe	Potência (mW)	Potência (dBm)	Alcance (m)
1	100	20	>100 (Longo)
2	2.5	4	>10 (Médio)
3	1	0	1 (Curto)

**Tabela 3.5** - Resumo das classes dos dispositivos *Bluetooth* e respectivas características.

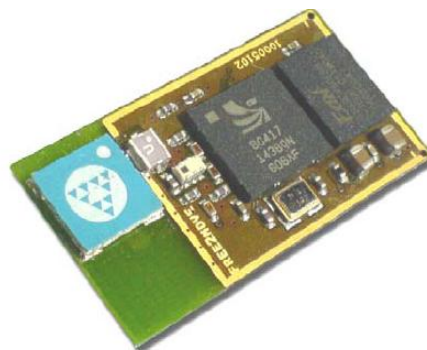
Recorrendo à tabela 3.5, verifica-se que o alcance dos dispositivos *Bluetooth* aumenta com a potência do sinal enviado. Esta é a forma de caracterizar este tipo de dispositivos, em prejuízo da taxa de transmissão, uma vez que esta varia consoante as características do meio em que se encontra.

Relativamente às classes, qualquer uma das anteriores poderá ser utilizada neste sistema, uma vez que o visitante irá transportar consigo tanto o dispositivo Estação, onde estará implementado o módulo *Bluetooth*, como o PDA. Deste modo, a distância entre eles será inferior a 1 metro, pelo que, nestas condições, todas as classes anteriores se encaixam. Dever-se-á então ter em conta os consumos em *stand-by* e em transmissão/recepção, a tensão de alimentação e o custo na escolha do módulo a implementar no sistema. De modo a facilitar a programação e a reduzir o tempo de trabalho relativo à implementação do módulo *Bluetooth* no sistema, será escolhido um módulo com comunicação série, o que diminui em muito o tempo de desenvolvimento do sistema, não existindo necessidade de grandes conhecimentos relativos ao protocolo *Bluetooth*. Foi levada a cabo uma pesquisa, tendo sido seleccionados os módulos mais interessantes para este projecto. Estes encontram-se discriminados na tabela 3.6:

Módulo (Fabricante)	Custo (€)	Vendedor (V)	V <sub>dd</sub> (V)	Sniff Mode	I <sub>min</sub> (mA)	I <sub>max</sub> (mA)	I <sub>med</sub> (mA)	Classe	Dimensões (mm)
OEMSPA311 (ConnectBlue)	32.33 46.47	DigiKey Farnell	3 a 6	Sim	1	70	17	1	16x36
OEMSPA310 (ConnectBlue)	24.80	DigiKey	3 a 6	Sim	7.9	70	17	2	16x36
BISMS02BI-01 (Ezurio)	50.74 26.98	RS ME	3.3 a 7	Sim	2.5	-	36	1	17.7x46
<b>F2M03GLA (Free2Move)</b>	<b>38.92</b>	<b>DigiKey</b>	<b>2.2 a 4.4</b>	<b>Sim</b>	<b>10</b>	<b>74</b>	<b>20</b>	<b>2</b>	<b>13x24</b>
RN21 (Roving Networks)	28.49	ME	3 a 3.6	Sim	2	100	40	1	15x21.8
WT12 (BLUEGIGA)	30.62	Farnell	3.1 a 3.6	Sim	2.3	70	20	2	14x25

**Tabela 3.6** - Módulos *Bluetooth* com comunicação série seleccionados (ME – Mouser Electronics; RS – RS-Components).

Fazendo uma breve análise à tabela 3.6, verifica-se que os módulos são muito idênticos, possuindo características muito semelhantes, pelo que, qualquer um deles poderia ser o escolhido. No entanto, apenas um destes será implementado no sistema, e apesar de o módulo OEMSPA311 da ConnectBlue apresentar uma melhor relação preço/consumo, o módulo F2M03GLA (figura 3.47), da *Free2Move*, a negrito na tabela 3.6, foi o escolhido. Este módulo apresenta características semelhantes aos restantes em termos de consumo e tensões de alimentação. No entanto destaca-se, essencialmente, em relação aos seus custo e dimensões reduzidas. Possui *sniff mode*, que corresponde a um estado de menor consumo e é compatível com o microcontrolador utilizado na Estação. Para além disso, a grande vantagem insere-se no facto de já se encontrarem em pesquisa aplicações que envolvem a utilização deste módulo na Universidade de Aveiro, onde foram desenvolvidas pequenas placas de circuito impresso que permitem a utilização do mesmo módulo numa outra aplicação ou num outro circuito. Desta forma o processo de desenvolvimento da comunicação *Bluetooth* entre MSP e PDA foi bastante facilitado.



**Figura 3.47** - Aspecto físico do módulo *Bluetooth* F2M03GLA.



### 3.4.4.2 - Implementação da ligação série MSP-Bluetooth

Para conexão via RS-232 do módulo *Bluetooth* com o MSP estão disponíveis os terminais 26 (*UART RTS*), 27 (*UART CTS*), 28 (*UART RX*) e 29 (*UART TX*) do módulo F2M03GLA. O terminal *UART RX* será o responsável pela recepção de dados proveniente do microcontrolador, o *UART TX* será utilizado para transmissão de dados do módulo F2M03GLA para o MSP, o *UART CTS* (*clear to send*) e o *UART RTS* (*request to send*) serão os responsáveis pelo controlo do fluxo de informação, caso este seja necessário. Os terminais *UART RTS* e *UART CTS* são *active low*, ou seja, estarão activos quando se encontram à tensão GND. O diagrama de conexão deste módulo pode ser encontrado na figura 3.48.

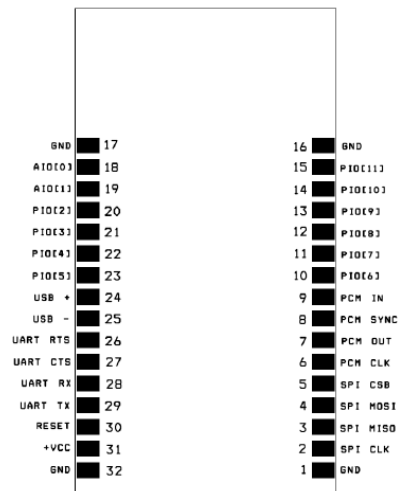


Figura 3.48 - Diagrama de conexão do módulo F2M03GLA.

Toda a comunicação pode ser reduzida à utilização do terminal *UART RX* do módulo *Bluetooth*, uma vez que apenas se pretende enviar informação do MSP para o módulo. No entanto ir-se-á implementar também a comunicação do módulo para o MSP, envolvendo a utilização do terminal *UART TX* do F2M03GLA, para o caso de futuramente este sentido de comunicação vir a ser necessário.

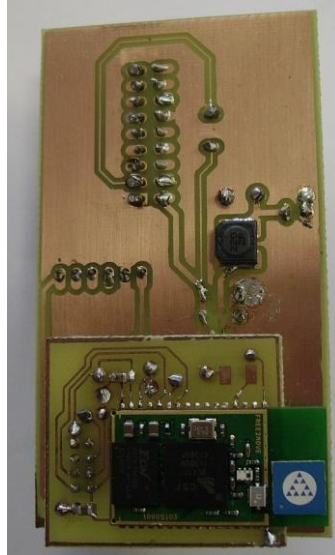
Inicialmente pretendia-se usar, na Estação, o microcontrolador MSP430F2012 mas, ao não possuir interface de comunicação *UART*, foi substituído pelo eZ430-RF2500, que possui um microcontrolador mais evoluído que o F2013, o F2274, que inclui interface de comunicação *UART*. Em relação ao controlo de fluxo este não será utilizado, uma vez que a comunicação a efectuar entre MSP e módulo *Bluetooth* não apresenta grande complexidade. Desse modo, o terminal *UART CTS* encontrar-se-á ligado à massa e o *UART RTS* permanece flutuante, o que evita o recurso ao controlo de fluxo de dados.

O módulo de testes para a comunicação *Bluetooth* integra um microcontrolador MSP430F274, um módulo *Bluetooth* F2M03GLA e um conversor DC-DC MAX1675.

O MSP e o módulo *Bluetooth* são alimentados a partir do conversor DC-DC, à tensão de 3.3V. Como ambos possuem a mesma tensão de alimentação, logo a mesma tensão para a comunicação RS232, esta poderá ser efectuada sem necessidade de recorrer a um *transceiver*. Assim, o terminal P3.4 do MSP, que consiste no terminal de transmissão de dados da *UART* do microcontrolador, irá ligar directamente ao terminal *UART RX* do módulo *Bluetooth*, o terminal de

recepção de dados. Será também implementada a comunicação física do módulo *Bluetooth* para o MSP, sendo que nesse caso serão utilizados os terminais P3.5 do MSP (terminal de recepção de dados) e *UART TX* do módulo *Bluetooth* (terminal de transmissão de dados).

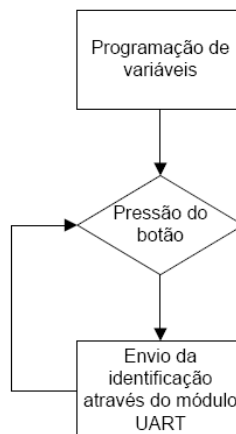
O esquema do circuito pode ser consultado no Anexo B.7 (Esquema do módulo de testes *Bluetooth*) e uma imagem do hardware implementado na figura 3.49.



**Figura 3.49** - Módulo de testes para a comunicação *Bluetooth* implementado.

#### 3.4.4.3 – Organização do *software* do módulo de testes *Bluetooth*

O módulo de testes *Bluetooth* tem como única função testar o envio de dados através do módulo *Bluetooth*. Este módulo de testes foi desenvolvido com o intuito de permitir o desenvolvimento do *software* para o PDA em paralelo, por parte da empresa interessada no projecto. A *flowchart* do mesmo encontra-se ilustrada na figura 3.50:



**Figura 3.50** – *Flowchart* do módulo de testes *Bluetooth*.

Ao ser inicializado, o sistema efectua a programação das suas variáveis, sendo colocado de seguida num estado de espera, em que aguarda uma interrupção. Esta será gerada pelo premir de um botão de pressão existente no hardware deste dispositivo. Após o botão ser premido os dados serão enviados através do módulo *UART* do MSP, que serão recebidos no módulo *Bluetooth*. As acções do premir do botão e do envio de dados serão identificados através dos *LEDs* do MSP, sendo que o *LED* vermelho irá mudar de estado caso o botão seja pressionado e o *LED* verde irá acender durante o envio da informação via *UART*.

### 3.4.5 – Organização do *software* da Estação

A Estação tem como principais funções enviar um pedido de identificação aos Faróis, fazer a desmodulação do sinal recebido e a recuperação da identificação após envio do pedido. O *flowchart* da Estação encontra-se na Figura 3.51:

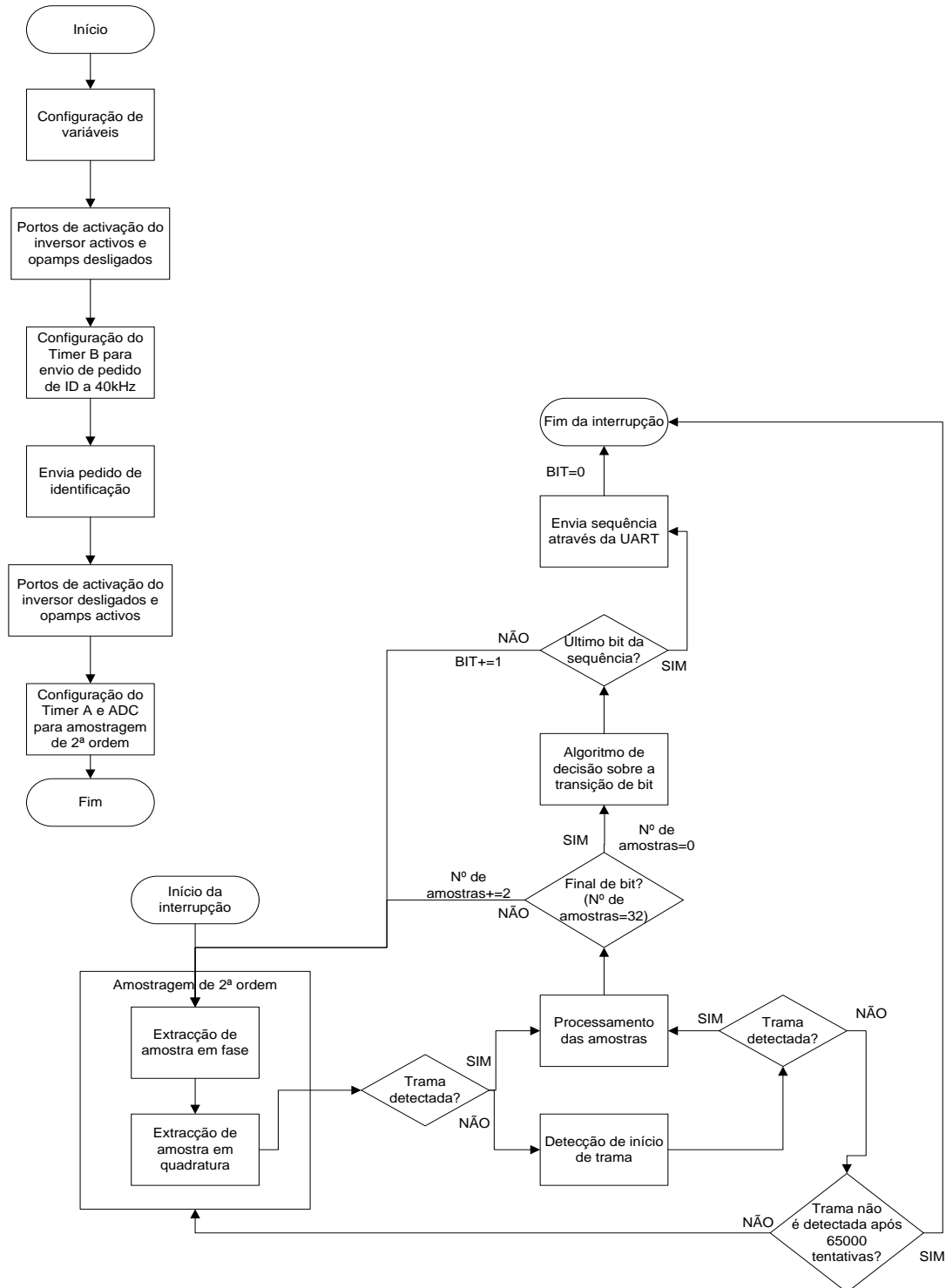
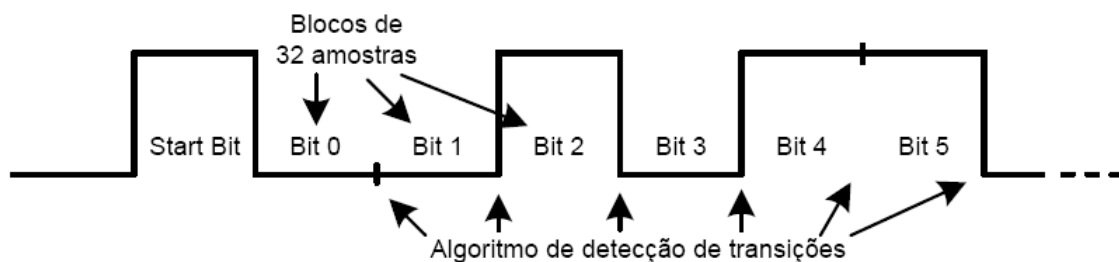


Figura 3.51 - Flowchart da Estação.

Inicializando a Estação, esta configura todas as variáveis necessárias ao bom funcionamento do sistema, enviando de seguida um pulso de ultra-sons, gerado pelo *timer B*, que irá funcionar como sinal de activação para os Faróis que o receberem. Terminado o envio do pulso, a Estação irá tentar detectar, periodicamente, o *start bit*, correspondente ao início de uma trama enviada por um Farol, o que indica que está a receber a identificação. Esta será realizada recorrendo a uma amostragem de segunda ordem à frequência de 8kHz. Este processo é realizado de forma síncrona, uma vez que a amostragem nos instantes correctos apenas é possível dado a frequência da portadora ser conhecida.

Após detecção do *start bit*, o primeiro bit do diagrama temporal da figura 3.52, inicia-se o processo de desmodulação, realizada também com base na amostragem de segunda ordem, à frequência de 8kHz, até que todos os bits da identificação sejam recebidos. Serão obtidos blocos de 32 amostras, correspondendo cada bloco a um bit. Em cada um desses blocos, 16 amostras correspondem à componente em fase e as outras 16 à componente em quadratura, permitindo efectuar a desmodulação do sinal. Quando as 32 amostras forem obtidas será tomada uma decisão em relação a esse bit, determinando se a esse bit corresponde ou não uma transição de fase. Este processo de aquisição de blocos de 32 amostras será repetido até que seja recolhida a informação de todos os bits, sendo que o algoritmo de detecção de transições de fase irá efectuar o processamento de cada bloco após todas as amostras desse bloco serem recolhidas, tal como esquematizado na figura 3.52.



**Figura 3.52** – Diagrama temporal do processamento de uma trama recebida.

Caso a trama não seja detectada após 65000 amostragens de segunda ordem, aproximadamente 4 segundos, a Estação irá enviar novo pulso de ultra-sons, de forma a iniciar nova detecção de trama, esperando-se que algum Farol receba o pedido de activação. No final, caso alguma identificação tenha sido recuperada, esta será enviada através do módulo *UART* do MSP e recebida e enviada pelo módulo *Bluetooth*. De referir o facto de que, no intervalo de duas amostragens de segunda ordem, dentro da mesma desmodulação, em que é efectuado o processamento das amostras, o sistema passa o restante tempo num estado de baixo consumo, já que não existirão operações a realizar até que novas amostras sejam recolhidas.

Para efeitos de redução de ruído e diminuição dos consumos da Estação, aquando do envio dos pedidos de activação, os *opamps* (MAX9917) serão colocados no estado de *shutdown*, desactivando o circuito receptor.

De modo a que durante o *debug* se tenha percepção do ponto em que se encontra a Estação, foi efectuada a configuração dos LEDs do MSP, de modo a que o LED verde mude de

estado sempre que a Estação efectue uma desmodulação e o vermelho apague durante o período de tempo em que sejam enviados pedidos de activação dos Faróis.

Um outro aspecto importante neste software é o facto de a identificação 127, que surge como '11111111' não ser permitida para envio via UART. Quando esta identificação for detectada após a desmodulação e decisão será simplesmente ignorada. Isto deve-se ao facto de uma Estação poder receber pedidos de activação provenientes de outras Estações, pedidos esses que seriam dirigidos aos Faróis, consistindo num motivo suficientemente válido para ignorar a identificação 127.

### 3.5 - PCBs

Para cada um dos dispositivos, Estação, Farol e módulo de testes *Bluetooth*, foi desenvolvida e criada uma placa de circuito impresso (*PCB – Printed Board Circuit*).

Para o caso da placa de testes para o módulo *Bluetooth*, apenas foram necessários alguns cuidados referidos no *datasheet* do conversor DC-DC MAX1675, sendo eles a proximidade das massas do MAX e dos condensadores de filtragem da tensão de saída proveniente do MAX1675. As alimentações dos vários componentes deverão estar, todas elas, ligadas a um ponto próximo do conversor, a chamada alimentação em estrela. Estes cuidados dever-se-ão ter em conta também para os restantes *PCBs*, uma vez que todos eles possuem um MAX1675 para gerar a tensão de alimentação de todos os componentes do circuito.

Em relação aos *PCBs* do Farol e Estação deve-se ter em conta que estes possuem uma parte digital e uma parte analógica que deverá estar o mais imune possível ao ruído. Para isso a alimentação da parte analógica estará desacoplada da parte digital por um filtro RC [13], o que vai reduzir as oscilações da alimentação geradas na parte digital por parte do microcontrolador, evitando que estas se propaguem para a parte analógica com a mesma amplitude que apresentam na parte digital.

Outro facto a ter em conta será a inclusão de planos de massa em ambas as faces [13] dos *PCBs*, o que por si só reduz possíveis interferências entre pistas ou componentes. Os planos de massa da parte digital e analógica deverão ser ligados apenas num ponto, próximo da massa das pilhas e do condensador principal, de modo a que possíveis oscilações da massa na parte digital não se propaguem em toda a sua amplitude para a parte analógica.

Os esquemas dos *PCBs* do Farol, Estação e módulo de testes *Bluetooth* podem ser encontrados no Anexos B.3 (PCB de um Farol), B.6 (PCB de uma Estação) e B.9 (PCB do módulo de testes *Bluetooth*), respectivamente.

## Capítulo 4 – Testes e resultados

Terminada a fase de projecto e implementação do sistema, resta verificar se o comportamento do mesmo se aproxima do esperado. Para isso foram realizados vários testes para a activação do Farol após envio de um pulso de ultra-sons por parte da Estação, para o circuito de activação através da luminosidade, para o envio de dados por *Bluetooth*, para a desmodulação e para o consumo dos dispositivos. No caso dos testes relativos à desmodulação do sinal recebido, foi medida a probabilidade de erro para um sistema simples de um Farol e uma Estação e para um sistema mais complexo, que inclui três Faróis e uma Estação, aproximando este último teste de uma aplicação mais próxima da realidade a que o sistema se destina.

Para todos os testes houve cuidados com as condições de execução dos mesmos. Os seus resultados serão alvo de análise e reflexão.

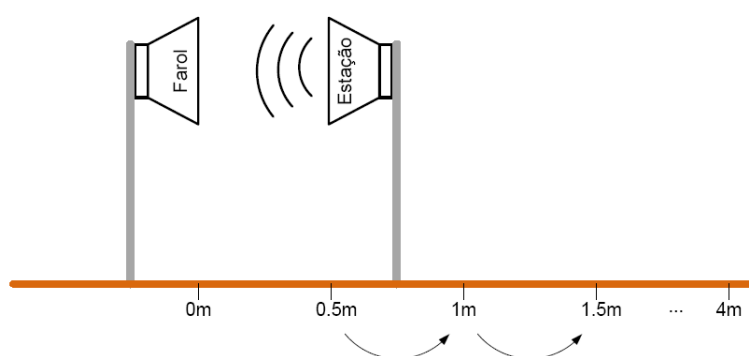
Estes testes foram realizados no laboratório de robótica do DETI – Universidade de Aveiro, não havendo perigo de interferências provocados por outros sistemas que visassem a utilização de ultra-sons, dado que este era o único sistema activo no momento dos testes. A aquisição dos dados foi feita através de uma *interface* USB para o *MatLab*.



## 4.1 – Testes de activação do Farol

O primeiro teste efectuado diz respeito à activação do Farol quando este se encontra no estado de baixo consumo, enquanto não recebe um pedido de identificação por parte de uma Estação. Neste teste a Estação enviou periodicamente um pedido de identificação através de ultra-sons, que irá ser recebido pelo Farol, despoletando uma interrupção que irá levar ao envio da identificação da obra periodicamente durante alguns segundos. A Estação foi programada para enviar 1000 pedidos de activação e foram contabilizadas as activaões efectivas do Farol.

Os testes foram realizados para distâncias de 0.5 a 4 metros, em intervalos de 0.5 metros.



**Figura 4.1** - Esquema utilizado para testes da activação de um Farol.

Os resultados obtidos para a activação do Farol estão apresentados na tabela seguinte:

Distância (m)	Número de activações	% Activação
0.5	1000	100%
1	1000	100%
1.5	1000	100%
2	1000	100%
2.5	1000	100%
3	997	99.7%
3.5	965	96.5%
4	869	86.9%

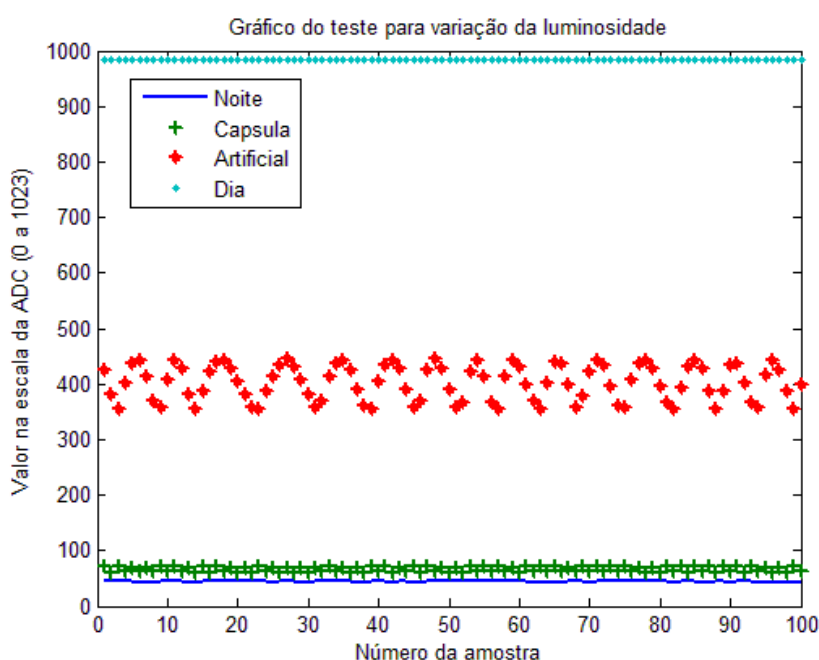
**Tabela 4.1** – Tabela dos resultados obtidos para activação do Farol.

Através de uma análise à tabela 4.1 verifica-se que, para distâncias inferiores ou iguais a 2.5m, a percentagem de activação obtida é de 100%. Com o aumento da distância entre Farol e Estação esta percentagem começa a ser reduzida, devido ao facto de a atenuação do sinal no meio provocar uma redução significativa da amplitude do sinal recebido pelo Farol. No entanto, verificou-se através dos testes que a activação do Farol é feita de forma razoavelmente eficiente.

## 4.2 – Testes do circuito de activação através da luminosidade

### • Testes para diferentes condições de luminosidade

O circuito de activação através da luminosidade, que inclui o fototransístor, foi igualmente alvo de testes. Foram efectuados testes mediante diversas condições com diferentes graus de luminosidade. Estes testes incluem a luminosidade no interior da sala durante o dia, a iluminação artificial durante a noite, a ausência de luz durante a noite e a envoltória do fototransístor com uma cápsula opaca, colocando o fototransístor num estado de ausência de luz. Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.2.



**Figura 4.2** – Comportamento do fototransístor mediante diferentes condições de luminosidade.

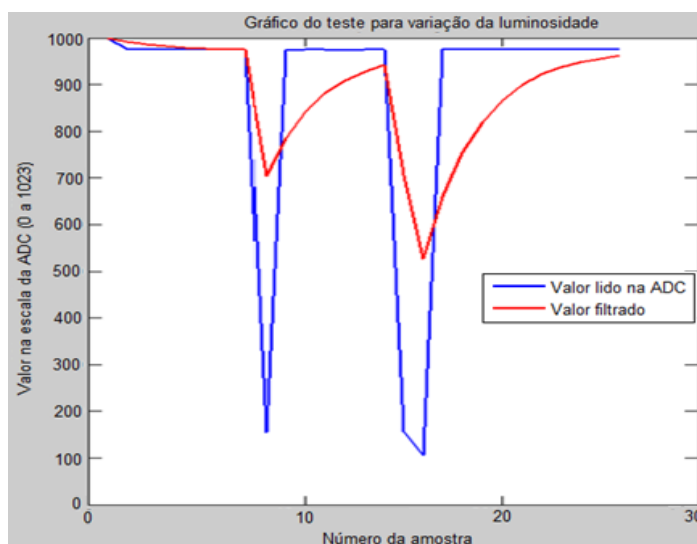
Da observação da figura 4.2, verifica-se que os valores da luminosidade extraídos durante o dia, no interior da sala, se encontram muito próximos do valor máximo da escala da ADC, uma vez que a luminosidade é muito elevada nestas condições.

O inverso acontece com as amostras obtidas durante a noite ou recorrendo ao uso da cápsula. Nestes casos a luminosidade incidente no fototransístor é muito reduzida, pelo que os valores extraídos pela ADC estão de acordo com as condições de teste.

Em condições de iluminação artificial, durante a noite, as amostras obtidas encontram-se em valores intermédios de luminosidade.

#### • Teste para amostras fortuitas de luminosidade

Foi efectuado um segundo teste para compreender o comportamento da filtragem IIR aquando da obtenção de uma ou duas amostras fortuitas. Para isso a saída da filtragem foi estabilizada num valor próximo do máximo e geradas uma ou duas amostras de baixo valor.



**Figura 4.3** – Comportamento do filtro IIR para amostras fortuitas de luminosidade.

Recorrendo a uma análise à figura 4.3, é possível averiguar que a existência de uma ou duas amostras fortuitas não permitem activar/desactivar o Farol, dado que os valores da filtragem não ultrapassam o limiar de 400 para desactivação. Deste modo, esta secção do sistema apresenta o comportamento desejado, não sendo o Farol desactivado caso sejam extraídas um ou duas amostras fortuitas.

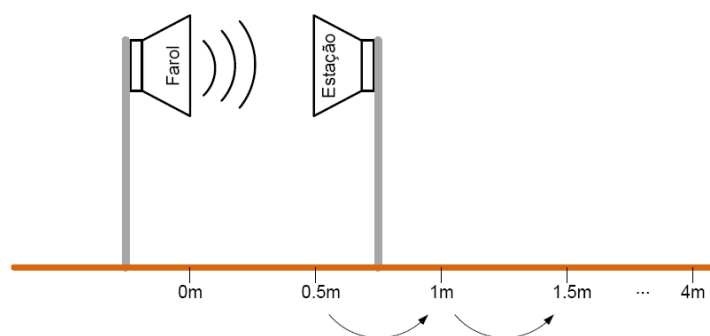
### 4.3 – Testes de desmodulação do sinal recebido

#### • Testes com um Farol e uma Estação

Neste ponto o primeiro teste a efectuar diz respeito à comunicação da identificação da obra do Farol para Estação. Numa primeira fase a comunicação foi estabelecida com um sistema que comporta apenas um Farol e uma Estação. O Farol envia periodicamente a identificação que será desmodulada na Estação. A Estação está constantemente a tentar detectar o início da trama, sendo que, quando este é detectado, é iniciada a desmodulação.

Este teste destina-se a verificar o correcto funcionamento do algoritmo de desmodulação e a avaliar até que distância a utilização deste sistema é viável. Para isso foram efectuadas comunicações Farol-Estação para várias distâncias, sendo estas iniciadas à distância de 0.5 metros, aumentando progressivamente de 0.5 em 0.5 metros até que o sinal recebido na Estação se encontre tão atenuado que não permita a desmodulação do sinal. Este teste foi realizado com

o objectivo de se obterem 5000 identificações, sejam elas a identificação correcta ou um erro. O esquema deste teste pode ser encontrado na figura 4.4.



**Figura 4.4** - Esquema do método utilizado para testes da comunicação entre um Farol e uma Estação.

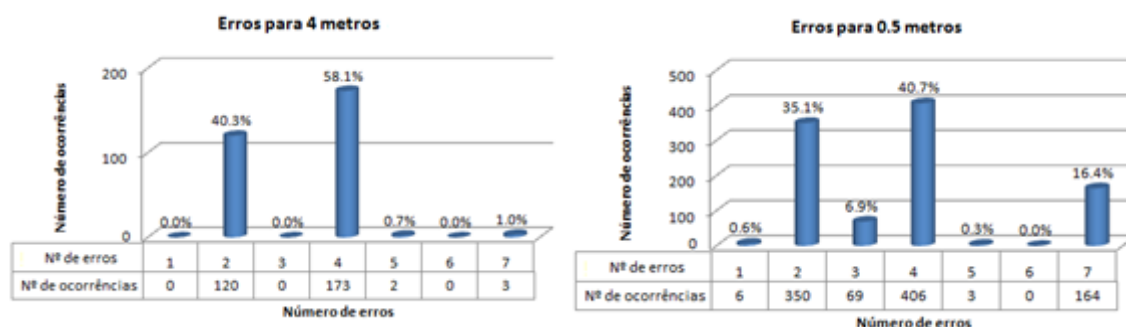


**Figura 4.5** – Posicionamento dos transdutores para testes à distância de 1 metro.

Os resultados obtidos neste teste encontram-se na tabela 4.2 e figura 4.5.

Distância (m)	Número de erros	BER
0.5	998	0.106
1	0	-
1.5	0	-
2	0	-
2.5	0	-
3	0	-
3.5	0	-
4	298	0.0274

**Tabela 4.2** – Tabela dos resultados obtidos para a desmodulação com um Farol e uma Estação posicionados frontalmente. São recebidas 5000 identificações por posição.



**Figura 4.6** – Quantificação do número de erros por sequência para as distâncias de 0.5 e 4 metros. São recebidas 5000 identificações por posição.

Efectuando uma análise às tabela 4.2 e figura 4.6, verifica-se que ocorreram apenas alguns erros para as distâncias de 0.5 e 4 metros. Dessa forma apenas é possível calcular o BER para essas distâncias, dado que não existem dados conclusivos acerca das outras distâncias para as quais foram realizadas medições. Para a distância de 0.5 metros, os erros obtidos devem-se, essencialmente, à saturação do sinal recebido, como referido no ponto 3.4.3. Já para a distância de 4 metros estes devem-se à baixa relação sinal-ruído do sinal recebido, dado que quanto maior a distância entre Farol e Estação, menor será essa relação.

Para uma separação de 0.5 metros foi registado um BER de 0.106 e para 4 metros um BER de 0.027. O primeiro não influencia o desempenho do sistema, dado que se pretende que funcione correctamente para distâncias de 1 a 4 metros. Já no caso de uma separação de 4 metros, existe uma probabilidade de 2.7% de ocorrência de erros.

Como o BER para distâncias de 1 a 4 metros é muito baixo, torna-se possível aumentar a taxa de transmissão e/ou reduzir a potência do emissor.

#### • Testes com três Faróis e uma Estação

De forma a tornar possível a comparação entre os resultados da desmodulação do sistema com a desmodulação dos testes realizados no trabalho anterior [3] e testar o comportamento do novo sistema em condições próximas do real, foram realizados também testes visando um sistema composto por três Faróis e uma Estação. A Estação foi posicionada em vários locais e direccionada para cada um dos Faróis, de forma a averiguar se é identificado o Farol correcto. O sistema de testes cumpria as condições listadas em baixo:

- Os Faróis estavam dispostos em linha;
- A separação dos Faróis entre si foi de 2 metros;
- Cada Farol possuía uma identificação única a enviar;
- A Estação encontrava-se colocada em posição frontal à linha de disposição dos Faróis, e a distância a esta variava de 1 a 4m, com intervalos de 1m;
- A Estação foi colocada em posição frontal a cada um dos Faróis e entre estes;
- Em cada ponto foram efectuadas medições, com a Estação direccionada para cada um dos três Faróis;

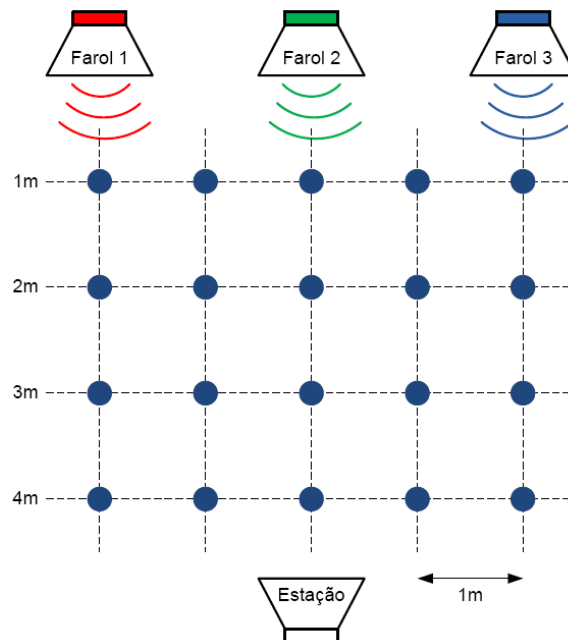
- Por Farol, foram transmitidas 4 a 5 tramas por segundo;
- Foi utilizada multiplexagem temporal no envio da identificação de cada Farol. Esta foi realizada recorrendo à função *rand()*, de modo a originar um intervalo aleatório entre envios;
- Os transdutores dos Faróis e Estação foram colocados à mesma altura;
- Considerou-se a velocidade do som aproximadamente constante (343,4m/s à temperatura ambiente de 19.2°C).

As sequências enviadas por cada um dos Faróis são compostas por 9 bits, de forma a que os resultados sejam facilmente comparáveis com os resultados dos testes efectuados no trabalho anterior. Na tabela 4.3 é possível encontrar a sequência de bits que codifica a identificação de cada um dos Faróis.

Farol	Identificação
1 (Vermelho)	'100110011'
2 (Verde)	'111000110'
3 (Azul)	'110011001'

**Tabela 4.3** – Tabela da sequência de bits da identificação de cada Farol.

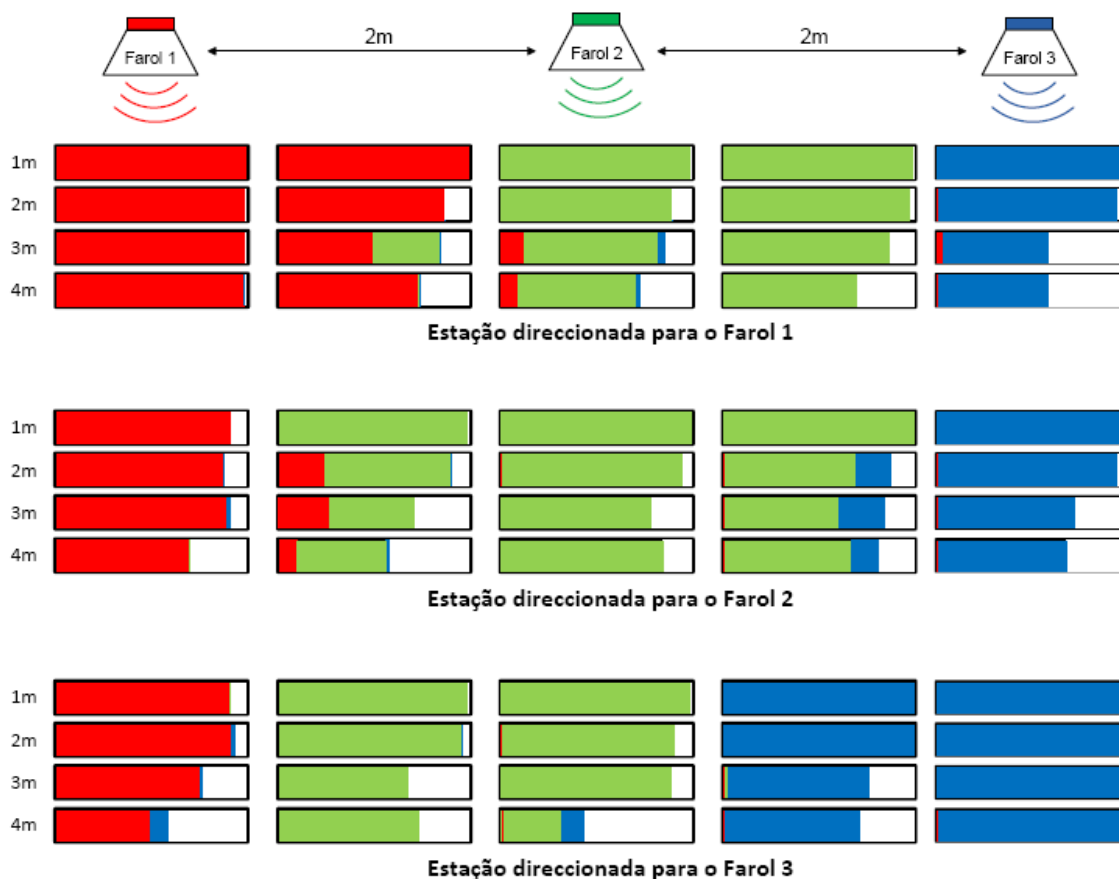
As posições de teste, pontos azuis, encontram-se discriminadas na figura 4.7. Para cada posição foram recebidas 1000 identificações, incluindo erros. Define-se como erro qualquer identificação recebida que não corresponda a nenhum dos três Faróis.



**Figura 4.7** - Esquema de testes para sistema com três Faróis e uma Estação.

O resultado dos testes efectuados são apresentados na figura 4.8. Esta figura permite deduzir a percentagem de identificações recebidas de cada um dos Faróis em cada uma das posições. Ao primeiro conjunto de quatro linhas correspondem as medições do esquema de

testes da figura 4.7, com a Estação direccionada para o Farol 1. O segundo conjunto de quatro linhas corresponde às medições efectuadas com a Estação direccionada para o Farol 2 e no terceiro conjunto a Estação encontra-se direccionada para o Farol 3. A percentagem das identificações recebidas de cada um dos Faróis é apresentada com a cor do Farol respectivo e os erros são representados pelos espaços em branco.



**Figura 4.8** – Resultados obtidos para testes com três Faróis e uma Estação.

Com recurso à figura 4.8 verifica-se que o sistema, num ambiente que simula a aplicação a que se destina, apresenta resultados muito encorajadores para os casos em que a Estação se encontra numa posição frontal a determinado Farol e direccionada para o mesmo. Nestas condições a percentagem de erros é muito baixa e a identificação obtida é em geral a correcta.

Com o aumento da separação entre Faróis e Estação, a relação sinal-ruído diminui. Esta diminuição, aliada ao facto de em determinadas zonas ser possível obter a identificação de mais que um Farol, contribui para um aumento da percentagem de erros e para a detecção de identificações de vários Faróis numa mesma posição e com a mesma orientação. Apesar disto, os resultados demonstram que o sistema cumpre os requisitos esperados, sendo possível delimitar as áreas de acção de cada Farol através de uma análise da percentagem de cada cor em cada posição.

Os resultados obtidos são reprodutíveis, embora o diferente posicionamento e orientação de Faróis e Estação possa provocar algumas discrepâncias, que não deverão diferir muito dos

resultados obtidos na figura 4.8. A tabela completa os valores das taxas de erros dos testes pode ser consultada no Anexo A (Tabela das taxas de erros).

### 4.3.1 – Comparação de testes com trabalho anterior

Como já referido, foram efectuados testes num trabalho anterior [3] que visavam avaliar a utilização de ultra-sons para transmissão de sequências. Neste trabalho foram realizados testes semelhantes, também com os Faróis distanciados de 2 metros, de forma a possibilitar a comparação dos resultados e avaliar a fiabilidade do sistema.

Analizando os resultados do trabalho anterior, figura 3.21, e deste trabalho, figura 4.8, verificam-se que, de um modo geral, os resultados se aproximam. Para posições frontais, em ambos os casos foram obtidas taxas de sucesso muito elevadas, a que correspondem baixas taxas de erros e a identificação do Farol correcto. Nos restantes casos os valores encontram-se próximos, variando para melhor ou pior, mas mantendo comportamentos próximos.

Tendo em conta que neste trabalho a tensão aos terminais dos transdutores é de 6.6Vpp e no anterior essa mesma tensão era de 12Vpp, os resultados podem ser considerados muito bons. A principal vantagem deste trabalho, em relação ao anterior, é a directividade dos transdutores. No primeiro trabalho a directividade dos mesmos era de 80º, enquanto que no sistema desenvolvido neste trabalho a directividade dos transdutores é de 70º, o que, de algum modo, contribui para uma menor taxa de erros e de obtenção de identificações de Faróis a maior distância.

## 4.4 – Consumos dos dispositivos

Neste ponto serão contabilizados os consumos de cada um dos dispositivos implementados, de modo a tornar possível a estimativa do tempo de duração das baterias para cada um dos dispositivos.

Foram levados a cabo alguns testes, com o intuito de estimar os consumos do Farol, estando estes disponibilizados para análise nas tabelas 4.4 e 4.5. Estes consumos foram medidos recorrendo a um voltímetro e uma resistência de 1Ω. A resistência foi colocada em série com o terminal positivo das pilhas ou fonte de alimentação, permitindo aproximar o valor da tensão lida pelo voltímetro à corrente requerida pelo circuito. Os valores teóricos dos consumos foram obtidos a partir dos *datasheets* dos componentes do Farol.

Consumo	Estado Activo	Estado <i>Low-Power</i>	Estado Nocturno
Teórico	4637.1 μA	137.8 μA	97.8 μA
Prático	7.26 mA	2.47 mA	2.42 mA

**Tabela 4.4** – Tabela dos consumos teóricos e práticos.

Como se pode verificar através da tabela 4.4, os consumos práticos são significativamente superiores aos consumos teóricos. Tal facto deve-se aos consumos teóricos do MSP se referirem



apenas ao MSP individualmente e não ao kit eZ430. Este último possui algumas funcionalidades extra activas, como é, essencialmente, o caso do componente CC2500, cujo consumo quando a alimentação do kit é ligado ultrapassa os 1.5mA de consumo. Outro factor preponderante para esta discrepância entre consumos teóricos e práticos é o facto de a tensão de alimentação ser inferior à tensão à saída do conversor DC-DC. Isto leva a que, para uma mesma potência consumida pelo circuito, a corrente pedida às pilhas seja superior. Este último factor é fácil de comprovar comparando os consumos dos MSP ligado a uma fonte de alimentação à tensão de 3.3V e ligado a um circuito alimentado por pilhas, com um conversor DC-DC que coloca 3.3V à saída.

Analisando a tabela 4.5, verifica-se que o consumo de corrente para o caso em que o MSP se encontra desligado do circuito e alimentado à tensão de 3.3V da alimentação é inferior ao registado para o caso em que o MSP se encontrava ligado ao circuito com o conversor DC-DC. Tendo em conta que neste último caso as pilhas apresentavam uma tensão aos seus terminais de 2.86V, poder-se-á calcular a potência consumida pelo MSP para ambos os casos:

- 3.3V (fonte de alimentação)

$$P = VI = 3.3V \times 1.92mA = 6.34mW$$

- 2.86V (pilhas)

$$P = VI = 2.86V \times 2.40mA = 6.86mW$$

Os valores obtidos para as potências consumidas em cada um dos casos encontram-se próximos. Tendo em conta que o conversor DC-DC possui uma eficiência de 94%, a potência consumida pelo MSP quando alimentado a pilhas será reduzida para 6.45mW, muito próximo do valor do consumo do MSP quando alimentado pela fonte.

De referir ainda, que a activação dos LEDs do MSP contribui também para um aumento dos consumos do dispositivo em larga escala, sendo que nos testes efectuados os LEDs se encontravam desligados.

Condições	Corrente requerida
MSP @ LPM3 (Estado Low-Power) desligado do circuito e alimentado a 3.3V	1.94mA
MSP @ LPM3 ligado a circuito com conversor DC-DC	2.40mA
LED vermelho	6mA
LED verde	3.3mA

**Tabela 4.5** – Tabela dos consumos do sistema em várias condições.

## Capítulo 5 – Conclusões e trabalho futuro

### 5.1 – Conclusões

Concluída a implementação de todo o sistema foi possível verificar, através da análise dos resultados obtidos, que este funciona dentro das especificações iniciais. O Farol é activado quando a Estação emite um sinal de ultra-sons para distâncias até 4 metros entre ambos. A Estação consegue, como pretendido, efectuar a desmodulação também nesse intervalo. Todo o sistema se encontra a funcionar de modo autónomo, sem necessidade de interacção com o utilizador.

Foram realizados esforços, aquando da implementação do hardware e software de modo a que o desempenho do sistema seja viável e possibilite uma elevada longevidade das pilhas, utilizando a cada momento apenas os requisitos necessários ao correcto funcionamento do sistema. Caso o Farol se encontre num ambiente em que, durante a noite, a luminosidade é reduzida, evita-se o recurso à interacção humana para desligar o dispositivo, já que este possui um modo nocturno em que o seu consumo é mínimo, permitindo que permaneça ligado durante a noite com um baixo consumo de energia.

Relativamente à Estação, esta apresenta bons resultados em relação à desmodulação e recuperação da identificação enviada pelo Farol. Os resultados com uma Estação e um Farol

provam que a desmodulação é fiável, conseguindo, na maior parte dos casos, detectar a identificação correcta dentro da separação de 1 a 4 metros prevista entre os dispositivos.

Os testes relativos à simulação de um ambiente de aplicação real, recorrendo a três Faróis e uma Estação, foram também bem sucedidos. Em posições frontais a identificação obtida corresponde ao Farol correcto, tendo-se obtidos nestes casos baixas taxas de erros. Nas restantes posições a taxa de erros foi, em alguns casos, superior, o que não inviabiliza o sucesso do sistema.

Relativamente aos custos do sistema, e recorrendo aos Anexo B.2 e Anexo B.5, verifica-se que o custo de um Farol do sistema actual é de cerca de 11.28€, enquanto o custo de uma Estação é de cerca de 49.75€. O custo de um Farol encontra-se num valor que pode ser considerado acessível para qualquer museu, enquanto o custo de uma Estação se encontra num valor mais elevado, devido essencialmente ao módulo *Bluetooth* que este integra.

## 5.2 – Aspectos do sistema a considerar

Um dos principais aspectos a considerar com a utilização deste sistema é a necessidade de uma distância mínima entre Faróis, de modo a evitar interferências entre os sinais enviados por cada um deles, caso estes emitam ao mesmo tempo. Um distanciamento mínimo de 2 metros é o aconselhável, obtendo-se bons resultados nestas condições. A utilização de multiplexagem temporal no envio das identificações contribui para uma diminuição das interferências.

O facto de os ultra-sons não atravessarem objectos é outro dos factores a ter em conta neste sistema. Caso um visitante se encontre entre um outro visitante e o Farol, a Estação do visitante que se encontra atrás não irá receber o sinal proveniente do Farol. Será necessário que exista um espaço aberto entre a Estação e o Farol.

A Estação deverá estar direccionada para o Farol do qual se pretende obter a identificação, caso contrário, ao estar a apontar para outro Farol, pode levar a que se obtenha a identificação deste último e não a pretendida. Pode também acontecer que, pelo facto de a Estação estar demasiado desviada da direcção correcta, esta não obtenha nenhuma identificação, por o ângulo que o seu transdutor faz com a posição frontal ao Farol não permitir adquirir qualquer tipo de sinal proveniente do Farol pretendido ou de qualquer outro. Preferencialmente, a Estação dever-se-á encontrar em posição frontal ao Farol da obra em questão, pelo que a forma como o utilizador orienta o dispositivo terá um papel preponderante para o bom funcionamento do sistema.

## 5.3 – Trabalho futuro

Apesar de o sistema se encontrar completamente implementado e a funcionar autonomamente, há ainda algumas arestas a limar. É o caso dos limiares de activação e desactivação do MSP através do valor da luminosidade. Há necessidade de efectuar uma “visita” a um museu para avaliar a luminosidade durante o dia e noite, com auxílio de um luxímetro, de forma a definir-se qual o melhor valor da resistência a usar no circuito do fototransístor e/ou

definir os melhores limiares para activação/desactivação do Farol. De referir ainda, que para cada museu, ou até para diferentes salas de um mesmo museu, estes valores podem variar.

Outro aspecto a melhorar serão os tempos durante os quais o Farol envia a sua identificação e a Estação tenta detectar o sinal proveniente dos Faróis. Será necessário algum estudo relativamente a este aspecto, de modo a que o tempo de espera até que a Estação obtenha uma identificação não seja demasiado longo do ponto de vista humano. O intervalo de tempo entre o envio de duas sequências por parte do mesmo Farol deverá também ser objecto de estudo. Isto será necessário dado que não se pretende que o ambiente interior da sala se torne num espaço “infestado” de sinais de ultra-sons.

O sistema não apresenta ainda o seu ponto de miniaturização máximo, uma vez que este pode e deve ser reduzido implementando todo o hardware recorrendo à tecnologia SMT (*Surface-Mount Technology*), o que irá reduzir em muito o espaço ocupado por condensadores, resistências e díodos. Deverá ser estudada a possibilidade da implementação de um microcontrolador MSP430F2274, ou outro mais actual e com novas funcionalidades, caso necessário, em vez do kit eZ430-RF2500 que, para além de ocupar mais espaço no PCB, aumenta o custo final do sistema. Isto trará alguns inconvenientes, como serão o caso da escrita no microcontrolador, neste caso, facilitada pelo kit de desenvolvimento, e a necessidade do recurso a um cristal externo, uma vez que o cristal utilizado neste trabalho se encontra integrado no módulo RF integrado no kit eZ430.

Relativamente ao módulo *Bluetooth*, o componente de maior custo deste sistema, poderá ser estudada uma alternativa a este. Uma opção poderá ser a criação de uma interface que permita a comunicação via USB com o PDA, já que estes vêm, geralmente, dotados de portas USB. Poderá, também, ser estudada uma alternativa ao inversor tri-state usado neste trabalho, uma vez que o seu consumo é relativamente elevado para a aplicação em questão.

Os consumos dos dispositivos deverão ter um papel crucial num trabalho futuro, dado que, após substituição do kit eZ430 apenas pelo microcontrolador MSP430F2274, os consumos deverão ser amplamente reduzidos, aproximando-se dos valores teóricos deste trabalho. Poderá também ser pesquisada uma alternativa para a alimentação, substituindo o conversor DC-DC ou diminuindo a tensão de saída do mesmo, estudando as alterações na taxa de erro das transmissões, dado que a tensão aos terminais dos transdutores irá também diminuir, resultando numa menor potência do sinal emitido.

Um outro ponto a trabalhar num projecto futuro será um estudo aprofundado do ruído e técnicas de redução do mesmo, de modo a reduzir ao máximo a quantidade de erros geradas pelo sistema.

## Referências

- [1] Haykin, Simon, "*Communications Systems*", 4th Edition , John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [2] D. Albuquerque, "SLUS - Sistema de Localização por Ultra-Sons", Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2007.
- [3] Flávio Sá, "SLIUSM – Sistema de Localização e Identificação por Ultra-sons para Museu", Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2008.
- [4] K. Ranganathan, M.K. Santy, T.N. Blalock, J.A. Hossack and W.F. Walker, Direct sampled I/Q beamforming for compact and very low-cost ultrasound imaging, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 51 (2004), pp. 1082–1094.
- [5] Flávio Sá, José Vieira and Carlos Bastos, "Developing an identification system for museums using ultrasound technology", DET Magazine, Aveiro, Portugal, 2008.
- [6] Mike Hazas and Andy Ward, "*A Novel Broadband Ultrasonic Location System*", Laboratory for Communications Engineering, University of Cambridge, United Kingdom
- [7] N. B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, "The Cricket Location-Support System", *Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, Boston, Massachusetts, August 2000.
- [8] "Cricket v2 User Manual", <http://cricket.csail.mit.edu>.
- [9] R. K. Harle and A. Hopper, "Deploying and Evaluating a Location-Aware System", *Proceedings of the Third International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, Seattle, WA, USA (MobiSys 2005), June 2005.
- [10] J. Hightower and G. Borriello, "Locations Systems for Ubiquitous Computing", *IEEE Computer Society*, volume: 34, issue 8 (pages 57-66), august 2001.
- [11] S. Yalavarthy, "An Analysis on Tracking User Location Systems", Department of Electrical & Computer Engineering, project under the guidance of Dr. Dale Callahan, University of Alabama.
- [12] W. Zhang, J. Djughash, and S. Singh, "Parrots: A Range Measuring Sensor Network", Technical report, Robotic Institute in Carnegie Mellon University, 2006.
- [13] Ott, Henry W., "*Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*", 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1988.
- [14] "How Bluetooth Technology Works", <http://www.bluetooth.com/Bluetooth/Technology/Works/>.
- [15] De Pinna, Simon. "*Forces and Motion*", Texas, Raintree Steck-Vaughn Publishers, 1998.
- [16] Sedra & Smith, "*Microelectronic Circuits*", 5th Edition, 2003

[17] Martin Howard, James A. S. Angus, *"Acoustics and psychoacousticsDavid"*, Focal Press, 3rd Edition, 2005

[18] [http://search.murata.co.jp/Ceramy/CatalogframeAction.do?sParam=MA40S5&sKno=G007&sTblid=A091&sDirnm=A09X&sFilnm=P1920U&sType=0&sLang=en&sNHinnm=MA40S5&sCapt=Notice\(Soldering\\_and\\_Mounting\)](http://search.murata.co.jp/Ceramy/CatalogframeAction.do?sParam=MA40S5&sKno=G007&sTblid=A091&sDirnm=A09X&sFilnm=P1920U&sType=0&sLang=en&sNHinnm=MA40S5&sCapt=Notice(Soldering_and_Mounting))

Anexo A – Tabela das taxas de erros

Tabela da percentagem das identificações recebidas de cada Farol para os vários posicionamentos da Estação																				
Farol 1						Farol 2						Farol 3								
	F1	F2	F3	ERROS		F1	F2	F3	ERROS		F1	F2	F3	ERROS		F1	F2	F3	ERROS	
Estação direccionada para o Farol 1																				
1m	100	0	0	0	100	0	0	0	0	99.7	0	0.3	0	99.9	0	0.1	0	0	100	0
2m	99.6	0	0	0.4	87.5	0	0.5	12.0	0	89.3	0.2	10.5	0	97.3	0	2.7	0.5	0	94.2	5.3
3m	98.9	0	0	1.1	50.0	34.4	0.9	14.7	12.0	70.5	2.6	14.9	0	87.1	0.2	12.7	2.4	0	56.3	41.3
4m	98.8	0	0.2	1.0	73.5	0.7	0.5	25.3	8.6	62.8	1.3	27.3	0	67.8	0	32.2	0.3	0	57.6	42.1
Estação direccionada para o Farol 1																				
	F1	F2	F3	ERROS		F1	F2	F3	ERROS		F1	F2	F3	ERROS		F1	F2	F3	ERROS	
1m	92.9	0	0	7.1	0	99.8	0	0.2	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	
2m	88.3	0	0.3	11.4	24.2	66.8	0.2	8.8	0.2	95.7	0.1	4.0	0.2	69.5	17.9	12.4	0.2	0	94.7	5.1
3m	89.8	0	0.8	9.4	26.9	44.2	0	28.9	0	78.0	0	22.0	0.5	60.7	23.4	15.4	0.2	0.1	75.4	24.3
4m	70.1	0.2	0.8	28.9	8.9	46.8	3.7	40.6	0	85.0	0.1	14.9	0.2	67.3	13.8	18.7	0.1	0	68.4	31.5
Estação direccionada para o Farol 2																				
	F1	F2	F3	ERROS		F1	F2	F3	ERROS		F1	F2	F3	ERROS		F1	F2	F3	ERROS	
1m	91.4	0.2	0	8.4	0	98.7	0	1.3	0	99.5	0	0.5	0	0	100	0	0	0	99.9	0.1
2m	92.3	0	0.9	6.8	0	96.3	0.1	3.6	0.1	91.4	0	8.5	0	0	100	0	0	0	100	0
3m	75.7	0	0.6	23.7	0	67.4	0	32.6	0	89.1	0	10.9	0.4	2.2	74.0	23.4	0	0	99.1	0.9
4m	48.3	0	10.9	40.8	0	73.5	0.5	26.0	0.6	30.8	11.4	57.2	0.2	0.8	70.4	28.6	0	0	97.1	2.9
Estação direccionada para o Farol 3																				

Tabela A.1 – Valores em percentagem obtidos para testes recorrendo a três Faróis e uma Estação.

## Anexo B – Hardware

### B.1 – Esquema eléctrico de um Farol

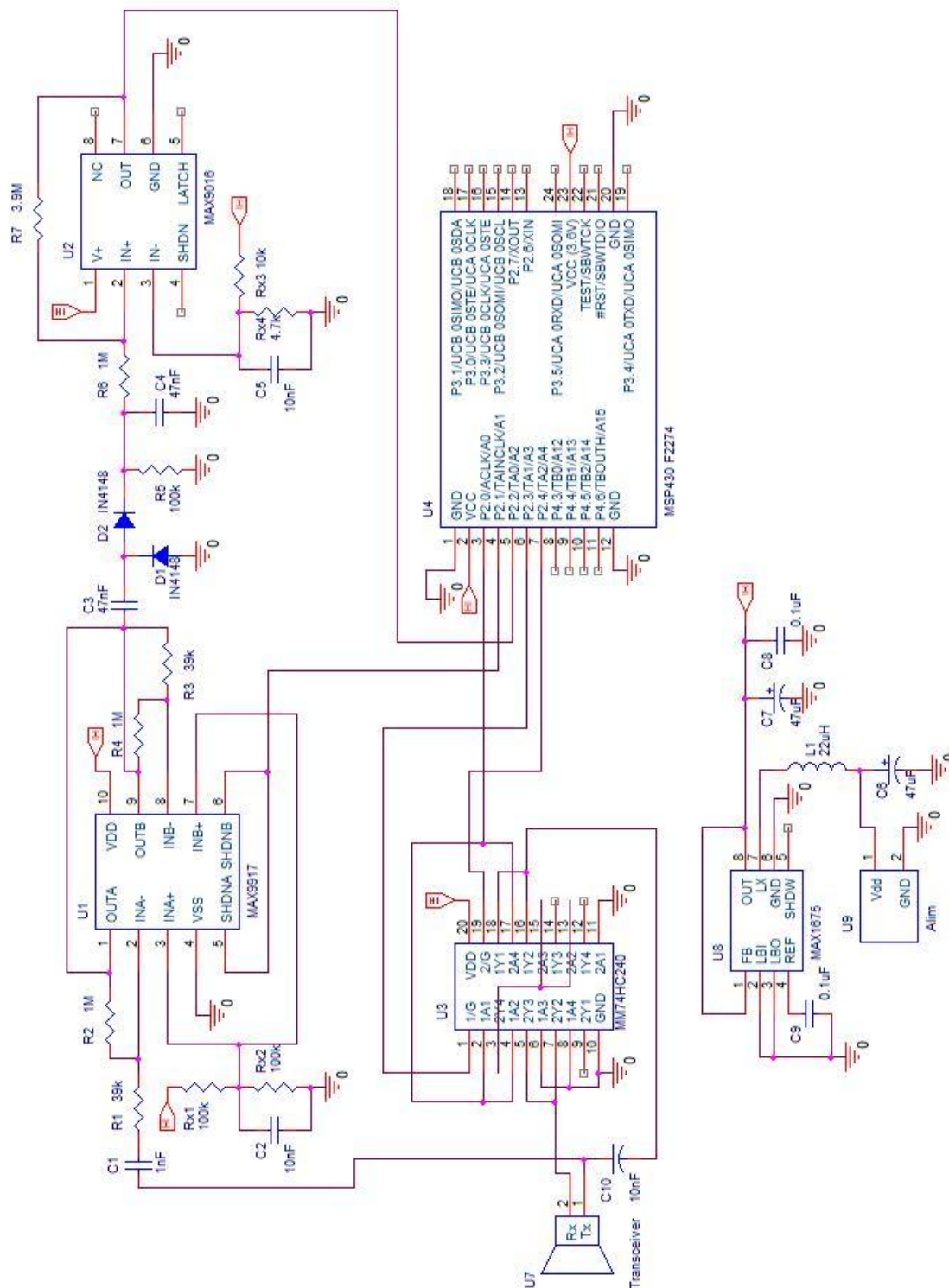


Figura B.1 – Esquema eléctrico de um Farol.



## B.2 – Lista de componentes de um Farol

Componentes	Quantidade	Descrição	Preço unitário
MSP430F2274	1	Microcontrolador	3.04€
MAX1675	1	Conversor DC-DC	2.09€
MAX9917	1	Amplificador x2	0.62€
MAX9015	1	Comparador	0.73€
MM74HC240WM	1	Inversor 3-state	0.20€
22μH	1	Indutância SMD	0.75€
Murata	1	Transdutor Ultra-sons	3.15€
PT480E	1	Fototransistor	0.22€
1N4148	2	Díodo de sinal	0.02€
100Ω	1	Resistência CR25	0.01€
33kΩ	2	Resistência CR25	0.01€
47kΩ	2	Resistência CR25	0.01€
82kΩ	1	Resistência CR25	0.01€
100kΩ	1	Resistência CR25	0.01€
1MΩ	5	Resistência CR25	0.01€
10MΩ	1	Resistência CR25	0.01€
1nF	1	Condensador Cerâmico	0.02€
10nF	2	Condensador Cerâmico	0.02€
47nF	2	Condensador Cerâmico	0.02€
100nF	3	Condensador Cerâmico	0.02€
100μF	3	Condensador Electrolítico	0.05€
<b>Total</b>			<b>11.28€</b>

**Tabela B.1** – Lista de componentes utilizados no circuito receptor do Farol.

### B.3 – PCB de um Farol

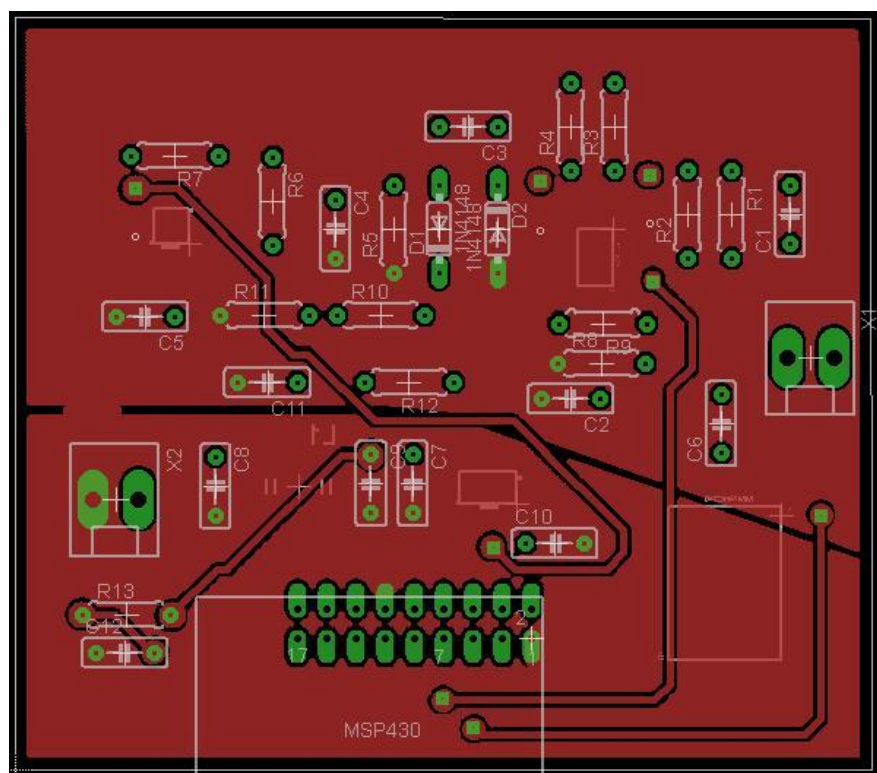


Figura B.2 – PCB de um Farol (Top).

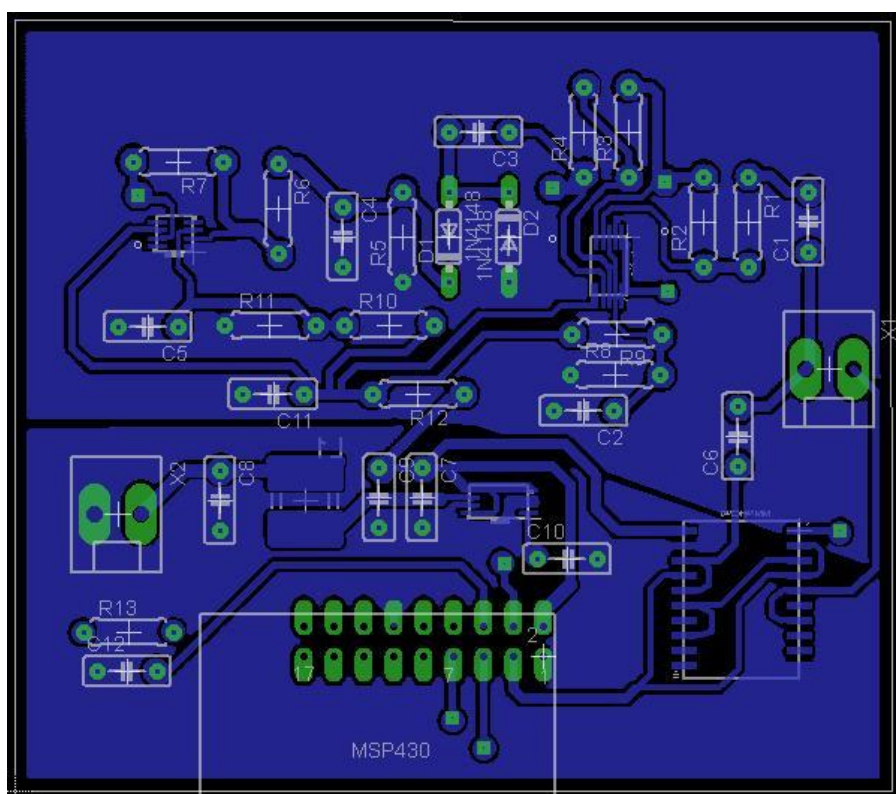
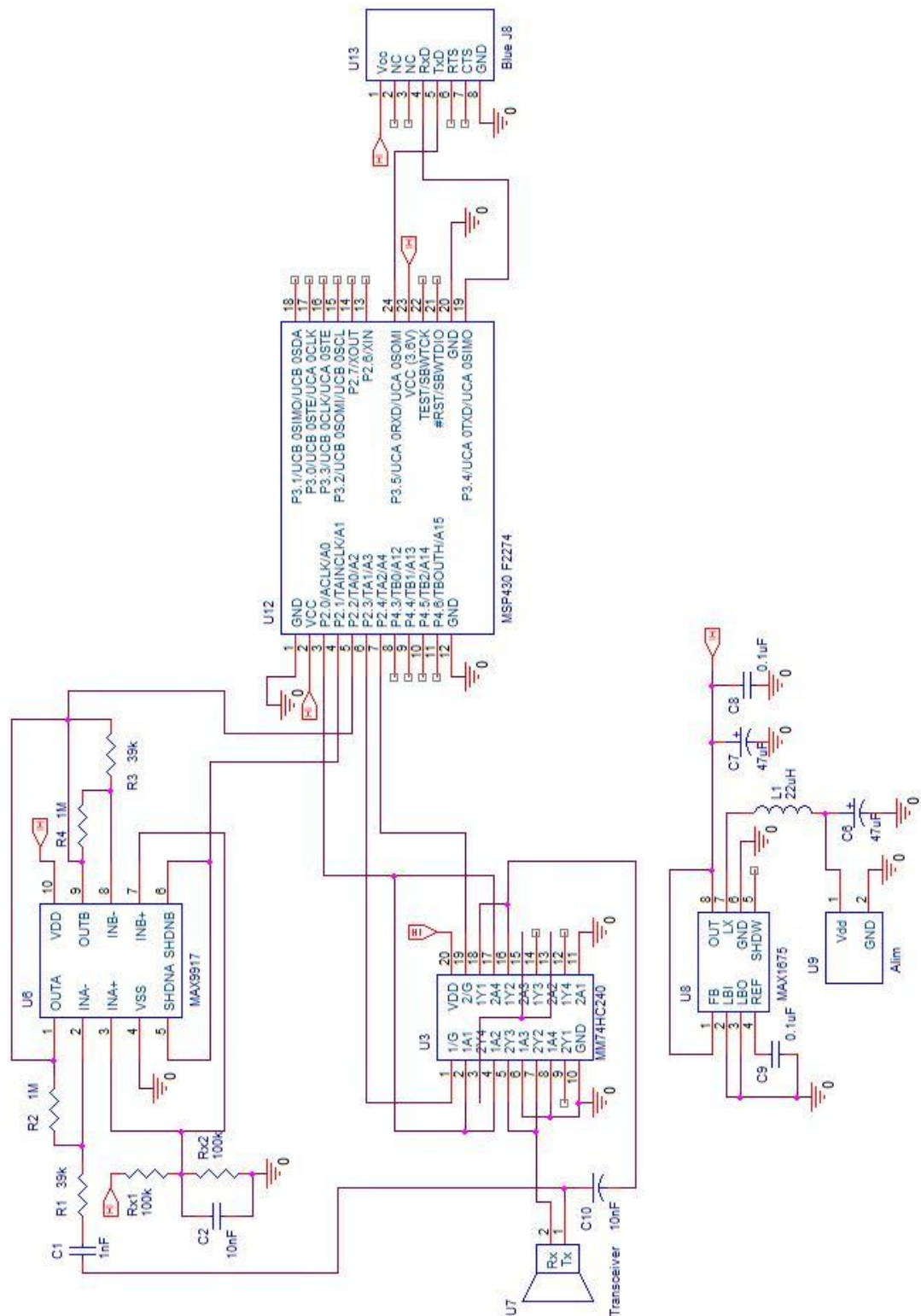


Figura B.3 – PCB de um Farol (Bottom).

#### B.4 – Esquema eléctrico de uma Estação



**Figura B.4 – Esquema eléctrico de uma Estação.**

## B.5 – Lista de componentes de uma Estação

Componentes	Quantidade	Descrição	Preço unitário
MSP430F2274	1	Microcontrolador	3.04€
MAX1675	1	Conversor DC-DC	2.09€
MAX9917	1	Amplificador x2	0.62€
F2M03GLA	1	Módulo <i>Bluetooth</i>	38.92€
MM74HC240WM	1	Inversor 3-state	0.20€
22µH	1	Indutância SMD	0.75€
Murata	1	Transdutor Ultra-sons	3.15€
1N4148	2	Díodo de sinal	0.02€
100Ω	1	Resistência CR25	0.01€
47kΩ	1	Resistência CR25	0.01€
100kΩ	1	Resistência CR25	0.01€
1MΩ	4	Resistência CR25	0.01€
100nF	1	Condensador SMD	0.12€
1µF	1	Condensador SMD	0.10€
1nF	1	Condensador Cerâmico	0.02€
10nF	1	Condensador Cerâmico	0.02€
100nF	3	Condensador Cerâmico	0.02€
100µF	3	Condensador Electrolítico	0.05€
<b>Total</b>			49.75€

**Tabela B.2** – Lista de componentes utilizados no circuito receptor da Estação.

## B.6 – PCB de uma Estação

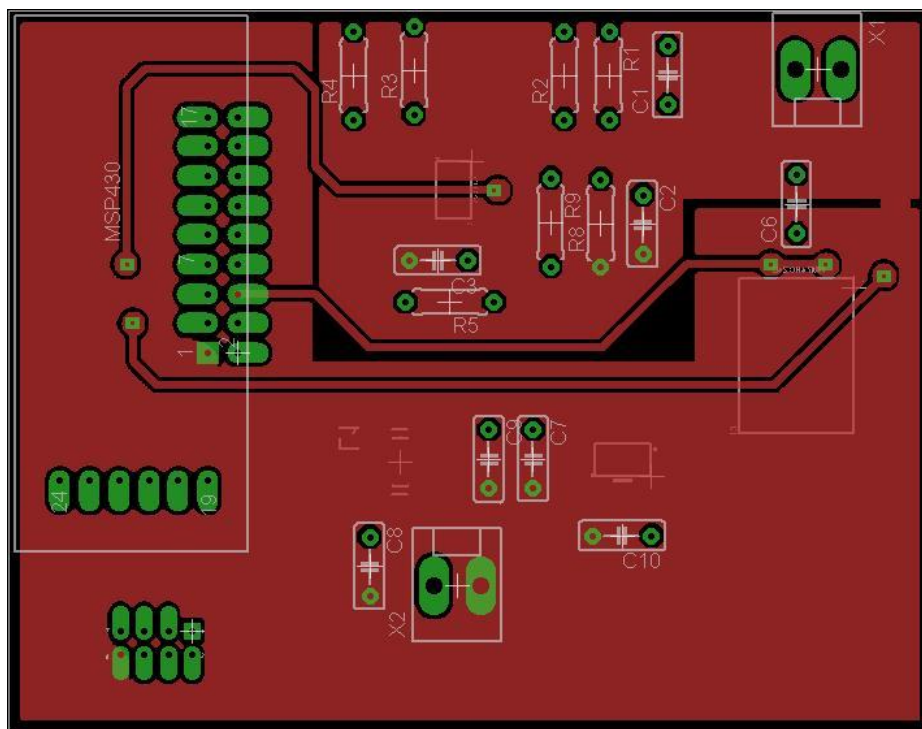


Figura B.5 – PCB de uma Estação (*Top*).

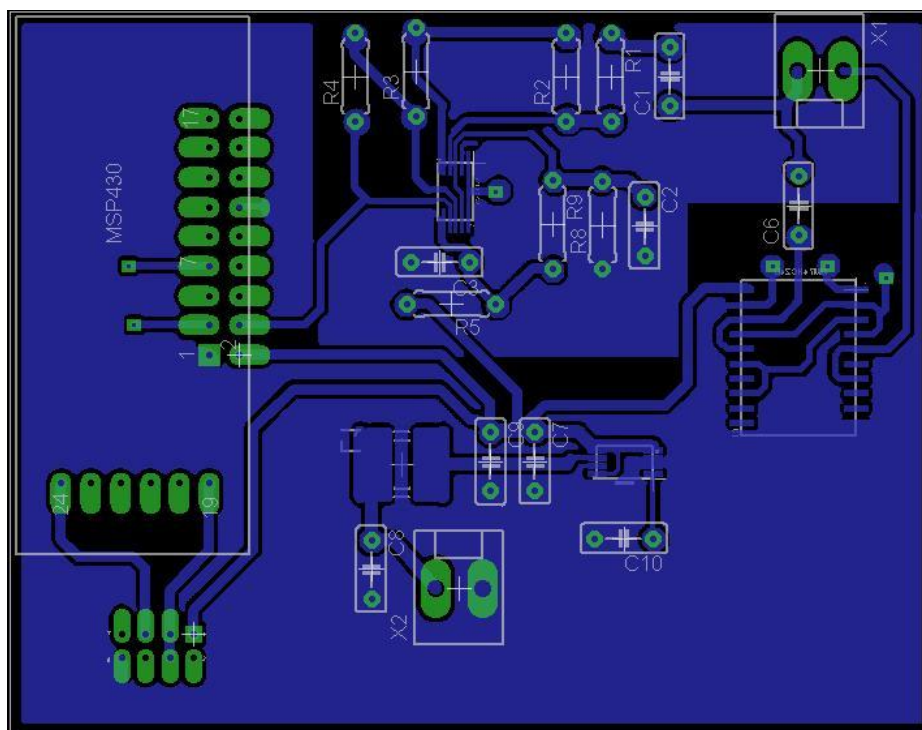


Figura B.6 – PCB de uma Estação (*Bottom*).

## B.7 – Esquema eléctrico do módulo de testes *Bluetooth*

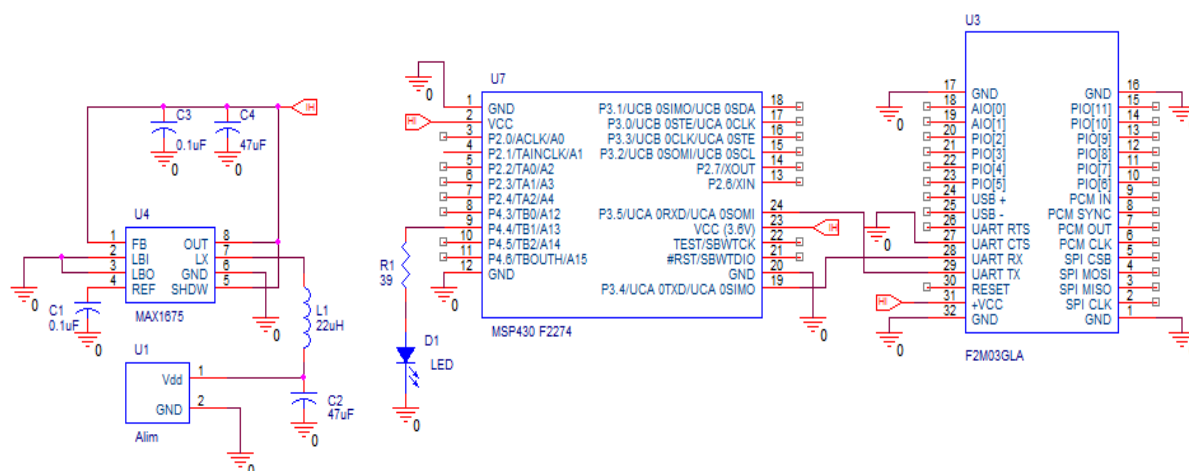


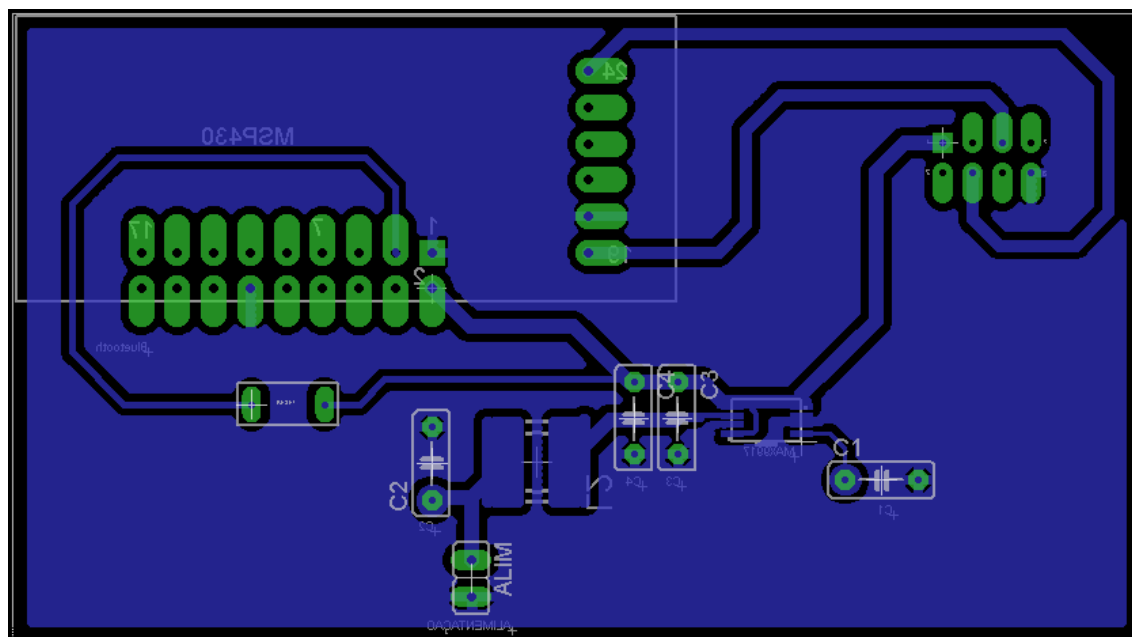
Figura B.7 - Circuito do módulo de testes para a comunicação *Bluetooth*.

## B.8 – Lista de componentes do módulo de testes *Bluetooth*

Componentes	Quantidade	Descrição
MSP430F2274	1	Microcontrolador
MAX1675	1	Conversor DC-DC
F2M03GLA	1	Módulo <i>Bluetooth</i>
39Ω	1	Resistência
100nF	1	Condensador SMD
1μF	1	Condensador SMD
100nF	2	Condensador Cerâmico
47μF	2	Condensador Electrolítico
22μH	1	Indutância SMD

Tabela B.3 - Lista do material utilizado.

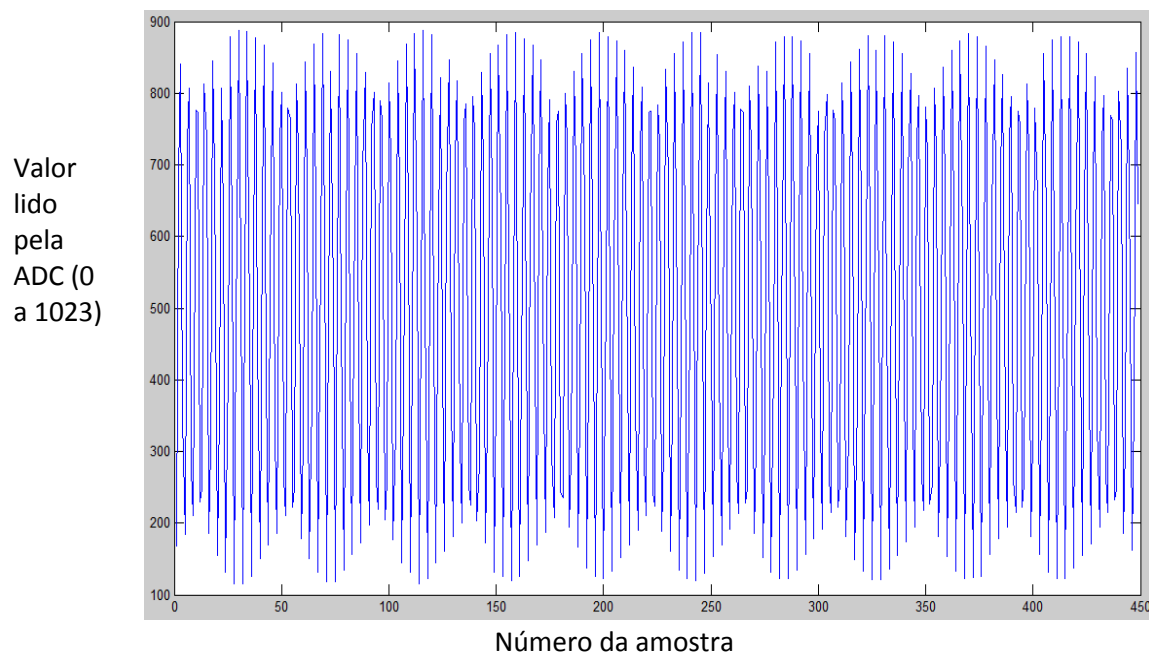
## B.9 – PCB do módulo de testes *Bluetooth*



**Figura B.8** – PCB do módulo de testes para a comunicação *Bluetooth* (Bottom).

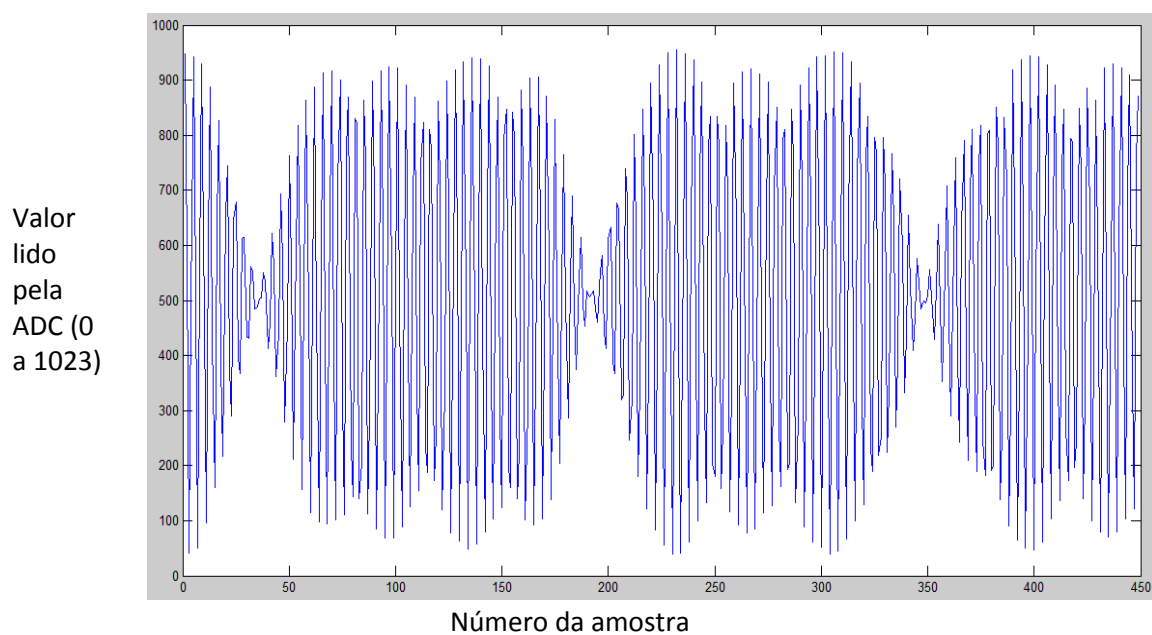
## Anexo C - Amostragem de sinais a 160kHz

a) Amostragem a 160kHz de um excerto da sequência '11111111', centrada em 1.65V e com limites de 200mV e 3V. (ficheiro 's2.txt')



**Figura C.1** - Amostragem a 160kHz de um excerto da sequência '11111111'.

b) Amostragem a 160kHz de um excerto da sequência '10101010' centrada em 1.65V e com limites de 100mV e 3V. (ficheiro 'Seq10101010 v2.txt')



**Figura C.2** - Amostragem a 160kHz de um excerto da sequência '10101010'.